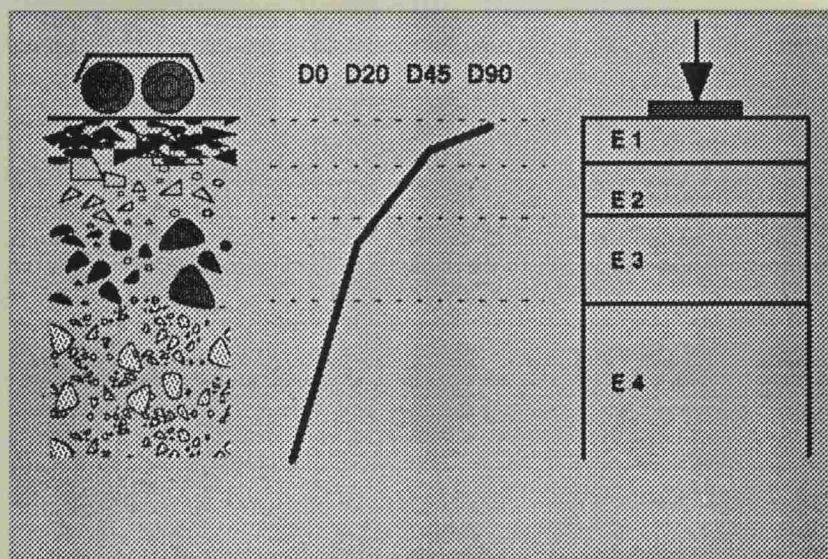
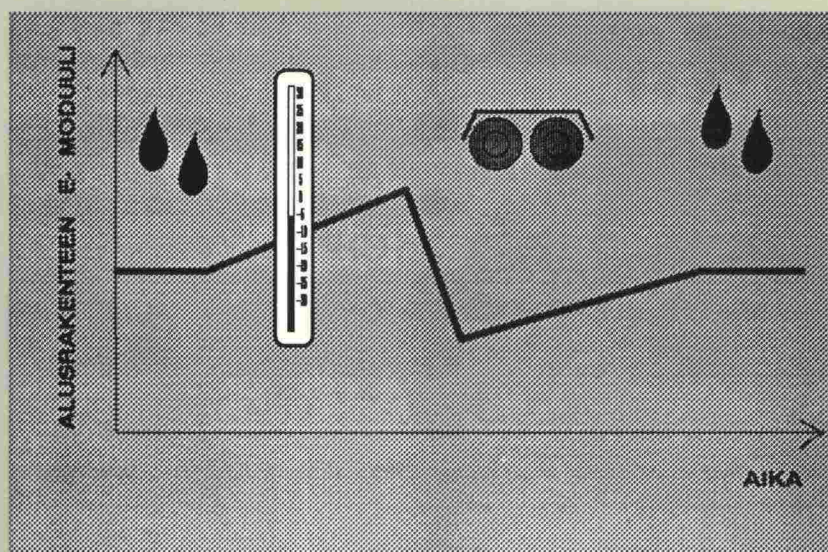


Tielaitos

Harri Kotimäki

Tierakenteen kantavuusvaihtelu ja laskennalliset kantavuudet



Tielaitoksen
selvityksiä

25/1991

Helsinki 1991

Tiehallitus
Kehittämiskeskus

Tielaitoksen selvityksiä
25/1991

Harri Kotimäki

**Tierakenteen kantavuusvaihtelu
ja laskennalliset kantavuudet**

Tielaitos
Tiehallitus, Kehittämiskeskus

Helsinki 1991

ISBN 951-47-4960-X
ISSN 0788-3722
TIEL 3200024
Tähti-Offset Ky
Helsinki 1991

Julkaisua myy
Tiehallitus, painotuotevarasto

Tielaitos
Tiehallitus
Opastinsilta 12 A
PL 33
00521 HELSINKI
Puh. vaihde (90) 1541

KOTIMÄKI, Harri: Tierakenteen kantavuusvaihtelu ja laskennalliset kantavuudet
[Vägarnas bärighetsvariation samt jämförelse mellan uppmätta och beräknade bärighetsvärden]. Helsinki 1991, Tiehallitus, kehittämiskeskus. Tielaitoksen selvityksiä 25/1991, 120 s.+liitt. 9 s. ISBN 951-47-4960-X, ISSN 0788-3722, TIEL 3200024

Asiasanat kantavuus, tierakenne, ilmasto, E-moduuli

Tiivistelmä

Selvityksen teoreettisessa osassa tarkastellaan kirjallisuuden perusteella tierakenteen kantavuuteen ja kantavuusvaihteluun vaikuttavia tekijöitä sekä esitellään materiaaliominaisuuksien riippuvuutta jännitystilasta ja kantavuuden kimmoteoreettista laskemista materiaaliominaisuuksien perusteella. Pudotuspainolaitteen avulla mitattujen taipumien perusteella voidaan arvioida tierakenteen parantamistarvetta, mikä esitetään muutaman tyypillisen esimerkkirakenteen avulla. Käyttökelpoisia tunnuslukuja ovat D 45, joka kuvaa alusrakennetta ja D 0 - D 45, joka sopii kantavan kerroksen arvosteluun sora- ja öljysorateilla.

Eri osissa Suomea mitattiin sulan ajan kantavuuksia noin kahden viikon välein eri laitteilla ja erilaisilla teillä. Kahden ensimmäisen vuoden mittausten perusteella pyrittiin löytämään yhteys sää- ja ilmastotekijöiden sekä mitatun kantavuusarvon välille. Tutkittiin heikoimman kevätkantavuuden suuruutta ja esiintymisaikaa alueittain ja tietyypeittäin. Selittäjiksi valittiin mm. pakkasmäärä, pohjaveden asema ja edeltävä eri pituisten jaksojen sademäärä. Sateilla pyrittiin myös selittämään kevätkantavuuden jälkeistä kantavuusvaihtelua. Tuloksena saatiin pikemminkin suuntia eri tekijöiden vaikutuksille kuin malleja, joilla kantavuuksia voitaisiin ennustaa. Ilmastollisten erojen vaikutus tuli esiin kevätkantavuuden esiintymisajassa, mutta vähintään yhtä paljon vaikuttavat pohjamaan laatu, muu tien rakenne ja paikalliset olosuhteet.

Kantavuuden vuodenaikavaihtelussa on erotettavissa toisistaan poikkeavia osia, jolloin eri tekijöiden merkitys kantavuudelle tulee esiin. Lämpötilan kehittyminen edeltävänä talvena vaikuttaa kevätkantavuuteen ja sademäärät selittävät vasta tiivistymisvaiheen jälkeistä kantavuutta. Kantavuuksien vuodenaikavaihteluun vaikuttavien tekijöiden havainnollistamiseksi piirrettiin pudotuspainolaitteilla mitattujen koealueiden osalta kuvat taipumasuppiloista ja niiden perusteella lasketuista kantavuuksista. Tutkimuksessa verrattiin myös laskennallisia kantavuuksia mitattuihin kevätkantavuuksiin eri pohjamaalajeilla ja arvioitiin käytettyä laskentamenetelmää.

KOTIMÄKI, Harri: Tierakenteen kantavuusvaihtelu ja laskennalliset kantavuudet

[Seasonal variation of road bearing capacity and difference between measured and calculated E-values]. Helsinki 1991, Finnish National Road Administration. FinnRA Reports 25/1991, 120 p.+ appendix 9 p. ISBN 951-47-4960-X, ISSN 0788-3722, TIEL 3200024

Keywords bearing capacity, road, climate, weather, E-module, apparent resilient module

Abstract

In the theoretical part of the study, mainly based on existing literature, some factors affecting the bearing capacity of roads are presented. Seasonal variations in bearing capacity as well as the stress-dependence of material properties are explained. From the theory of linear elasticity the calculation formulas of apparent resilient module are included. The commonly used parameters calculated from falling weight deflectograph measurements are presented. To be used in rehabilitation design of Finnish roads the third sensor reading of the KUAB-set of measurement points (D 45) is suitable for determining variations in the subgrade. The difference of centre deflection and the third sensor reading (D 0 - D 45) indicates the state of base course in typical road structures in Finland.

Bearing capacities have been measured in different parts of Finland at intervals of approximately two weeks. The measurements were made with various devices and road structures, mainly on secondary roads. Using the data from the first two years of measurements the lowest apparent resilient module of a road (and its appearance time) was compared with prior weather conditions. The chosen variables to explain the differences were frost index, ground water changes and rain, as accumulated from different number of days. Variations of bearing capacity after the weakest time were studied together with prior rainfalls, only slight effects were found. Local conditions, mainly the type of subgrade soil, have at least as much to do with spring weakening as do the climatic differences in Finland.

There are stages in the seasonal variations of bearing capacity, when different factors have more of an effect. Spring bearing capacity depends some what on the temperature development during freezing. The effect of rain becomes more dominant during late summer and fall, when the road has reconsolidated. Some charts of the measured deflections along with E-values are included. Measured bearing capacities (lowest values) are compared with calculated ones to check the validity of given E-values in the Finnish design standards.

Alkusanat

Tien kantavuusvaihtelu on vuosittain toistuva ilmiö. Rakenteen kantavuutta mitataan eri aikoina ja mittaukset tulisi korjata vastaamaan tien heikointa kantavuutta, joka yleensä ilmenee keväällä. Tien kantavuus tulisi myös kyetä laskemaan, kun tunnetaan käytetyt materiaalit ja rakennekerrosten paksuudet.

Useassa tiepiirissä on tehty kantavuusseurantaa vuosina 1987-1989, jotta voitaisiin korjata tierekisterin tai suunnitelman vaatimat kantavuusmittaustulokset vastaamaan kevätkantavuutta. Oulun yliopistolta tilattiin tutkimus, jossa selvitetään kantavuuden vaihtelua. Samalla tarkistetaan suunnitteluohjeissa annettujen E-moduulien osuvuutta eli verrataan mitattuja ja laskennallisia kantavuuksia.

Työn tilaajaa on edustanut diplomi-insinööri *Kari Lehtonen* suunnitteluosaston kehittämiskeskuksesta. Työn on tehnyt tutkimusapulainen *Harri Kotimäki* yliopiston tie- ja liikennetekniikan laboratoriossa professori *Esko Ehrolan* ja tekniikan lisensiaatti *Jouko Beltin* johdolla.

Sisältö

1. JOHDANTO	10
2. TIERAKENTEEN KANTAVUUS	11
2.1 Kantavuuden peruskäsitteet	11
2.2 Kantavuuden mittausmenetelmät	14
2.3 Kantavuusvaihtelu	16
2.31 Tierakenteen vaikutus kantavuuteen	16
2.32 Ilmastotekijöiden vaikutus kantavuuteen	18
2.33 Kuormitusten ja tiiviyden vaikutus kantavuuteen	23
2.4 Laskennallinen kantavuus	26
2.41 Kerrosten E-moduulit	26
2.42 Laskennallisen kantavuuden määrittäminen	36
3. KOEALUEET JA TUTKIMUSAINEISTO	40
3.1 Yleistä	40
3.2 Koealueet	40
3.3 Tutkimusaineisto	41
3.31 Tehdyt mittaukset ja määritykset	41
3.32 Tutkimusaineiston käsittely	42
4. TUTKIMUSTULOKSET	46
4.1 Koealueiden kantavuus- ja sääolosuhteiden vaihtelu eri vuosina	46
4.2 Koealueiden kevätkantavuus	48
4.21 Kevätkantavuus ja kevätkantavuuskerroin	48
4.22 Kevätkantavuuteen vaikuttavat tekijät	48
4.23 Eri tierakennetyyppien kevätkantavuuskertoimet	54
4.3 Taipumasuppilot	58
4.31 Taipumasuppiloiden ja kerrosten E-moduulien yhteys	58
4.32 Koealueiden taipumasuppiloiden ja niistä määritettyjen kerrosten E-moduulien ajallinen vaihtelu	58
4.33 Taipumasuppiloiden hyödyntäminen tierakenteen parantamista suunniteltaessa	87
4.4 Laskennalliset ja mitatut kantavuudet	94
4.41 Yleistä	94
4.42 Tielaitoksen käyttämällä menetelmällä lasketut alusrakenteen E-moduulit	94
4.43 Mitatut ja Tielaitoksen käyttämällä menetelmällä lasketut kantavuudet	95
4.5 Laskentamenetelmien vertailu	105
5. TULOSTEN TARKASTELU	110
5.1 Tierakenteen kantavuusvaihtelu	110
5.2 Laskennalliset kantavuudet	110
5.3 E-moduulit	111

YHTEENVETO	115
KIRJALLISUUSLUETTELO	117

Käytettyjä merkintöjä:

a	kuormituksen kosketuspinnan tai kuormituslevyn säde, m
D, d	taipuma
$D(0), D_0$	kuormituslevyn keskeltä mitattu taipuma
$D(r), d(r)$	taipuma etäisyydellä r kuormituslevyn keskeltä
$D_0, D_{20}, D_{45}, D_{90}$	KUAB-laitteella mitattuja etäistaipumia
$D_0, D_{21}, D_{33}, D_{51}, D_{81}, D_{127}$	PHØNIX-laitteella mitattuja etäistaipumia
δ_1, δ_3	suurimmat pääjännitykset
δ_d	deviatorinen jännitys
E	kimmomoduuli
$E_0(r)$	pintamoduuli etäisyydellä r kuormituslevyn keskeltä
E_{kant}	kantavuusarvo
E_m	alemman kerroksen tai alusrakenteen E-moduuli
E_y, E_a	ylemman ja alemman kerroksen E-moduulit
$\varepsilon, \varepsilon_0$	suhteellinen muodonmuutos.
f, C	kertoimia
H, h	paksuus
h_e	ekvivalenttipaksuus
kkk	kevätkantavuuskerroin
krp	parannettu tie
M_R, M_r	kimmomoduuli
μ	Poissonin luku eli suppeumaluku
P	voima
Θ	pääjännitysten summa (jännitysinvariantti) = $\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$
R, r	säde, etäisyys
r	korrelaatiokerroin
rak	rakennettu tie
rtn	rakentamaton tie
S_u	siipikairauksella todettu suljettu leikkauslujuus
σ	jännitys, kosketuspaine
s	painuma
s_0	rakenteen kokonaispainuma tien pinnassa
σ_d	deviatorinen jännitys
$s_{h,m}$	pohjamaan painuma syvyydellä h
σ_v	vertailujännitys = 0.1 MN/m^2
σ_z	normaalijännitys syvyydellä z
t	kerroksen kokoonpuristuma
$t_1 \dots t_{(m-1)}$	alusrakenteen yläpuolella olevien kerrosten 1... (m-1) kokoonpuristumat

1. JOHDANTO

Suomessa käytössä oleva kuormitusmitoitusmenetelmä perustuu kantavuusarvoihin (tienpinnan maksimitaipumiin). Parantamistoimenpiteitä suunniteltaessa lähtökohdat ovat tavoitekantavuus, parannettavan tien kantavuus ja rakennusmateriaalien laatu. Kuormitusmitoitus on iteratiivinen eli kokeillaan erilaisia vahvistustoimenpiteitä ja määritetään Odemarkin kaksikerroskaavalla saavutettavat kantavuudet, joita verrataan tavoitekantavuuksiin. Kuormituskertaluvusta riippuva päällysrakenneluokka määrää puolestaan tavoitekantavuuden.

Kuormitusmitoitusmenetelmä perustuu tien heikoimpaan kantavuuteen eli ns. kevätkantavuuteen. Parannettavilla teillä kantavuus pyritään mittaamaan silloin, kun kantavuus on heikoimmillaan. Muulloin suoritettut kantavuusmittaukset korjataan kokemusperäisillä kevätkantavuuskertoimilla vastaamaan tien heikointa kantavuutta.

Suomessa yleisimmin käytetyt tien kantavuuden mittauslaitteet ovat levykuormituslaite, Benkelman-palkki ja pudotuspainolaite. Levykuormituslaitteella mitataan tien pinnan painumaa kuormituslevyn alla. Benkelman-palkilla mitataan tienpinnan taipuma kuorma-auton takakaksoispyörän välistä. Pudotuspainolaitteella kuormitus saadaan aikaan pudottamalla paino vaimentimelle, josta kuormitus siirtyy kuormituslevyn kautta tien pintaan. Kuormituksen aiheuttama taipuma mitataan seismisillä antureilla eri etäisyyksillä kuormituslevystä.

Tässä tutkimuksessa tarkastellaan teiden kantavuuden muutoksia kevään, kesän ja syksyn aikana sekä selvitetään alusrakenteen, päällysrakenteen, kuivatus- ja sääolosuhteiden vaikutusta kantavuuteen. Liian aikaisin tai myöhään tehdyille mittauksille pyritään määrittämään korjauskertoimet. Tutkimuksessa vertaillaan rakeisuuden perusteella saatavia ja pudotuspainolaitteella mitatun taipumasuppilon perusteella määritettyjä E-moduuleja sekä mitattuja ja laskennallisia kantavuuksia. Lisäksi selvitetään taipumasuppilon suoraa hyödyntämistä tierakenteen parantamista suunniteltaessa.

2. TIERAKENTEEN KANTAVUUS

2.1. Kantavuuden peruskäsitteet

Tien kantavuudella tarkoitetaan tierakenteen kykyä kestää liikennekuormitusten aiheuttama rasitus ja estää pysyvät muodonmuutokset. Kantavuus ilmaistaan tavallisesti taipumana, jonka tietyn suuruinen kuorma saa aikaan tai koko tierakenteen näennäisenä kimmokertoimenä. Tierakenteen kantavuusarvo (näennäinen kimmokerroin) lasketaan maksimipainumasta eli kuormituksen keskikohdan painumasta seuraavalla likiarvokaavalla:

$$E_{\text{kant}} = 1,5 \cdot a \cdot \sigma / s \quad (1)$$

missä E_{kant} on kantavuusarvo, MN/m^2
kerroin $1,5 = 2 \cdot (1 - \mu^2)$; μ on suppeumaluku = 0,5
 a on kuormituksen kosketuspinnan säde, m
 σ on kosketuspaine, kN/m^2
 s on mitattu painuma, mm

Tien eri rakennekerrosten ominaisuuksia kuvataan kimmomoduulilla (E-moduulilla) ja Poissonin luvulla. Hooken lain mukaan materiaalin kimmomoduuli määritellään yhtälöllä:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (2)$$

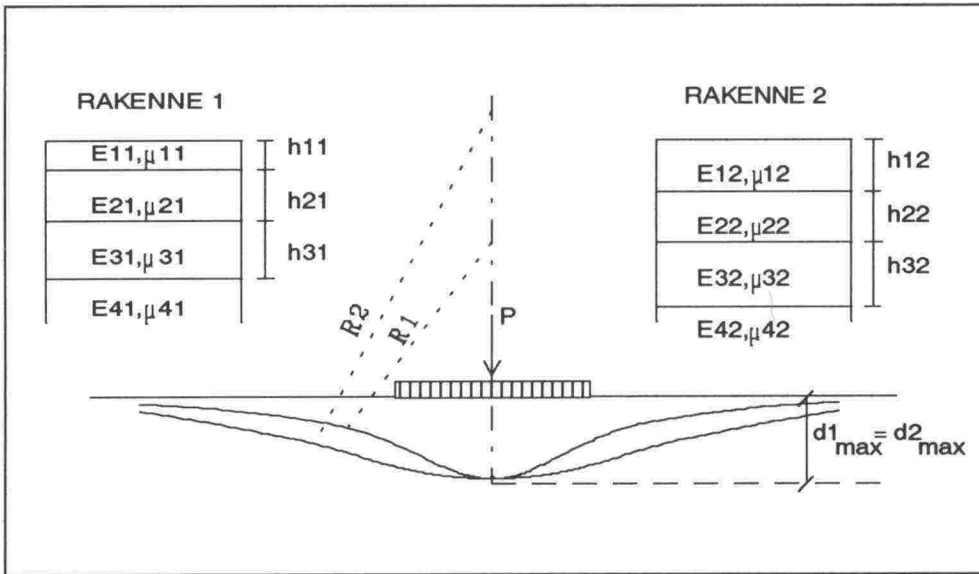
missä E on kimmomoduuli, MN/m^2
 σ on jännitys, MN/m^2
 ε on suhteellinen muodonmuutos.

Materiaalin Poissonin luvulla (suppeumaluvulla) tarkoitetaan kuormituksen suuntaan nähden kohtisuoran muodonmuutoksen suhdetta kuormituksen suuntaiseen muodonmuutokseen.

Kimmoteorialla määritettyä kantavuusarvoa kutsutaan laskennalliseksi kantavuudeksi. Laskelmissa tarvitaan materiaalien kimmomoduulit, Poissonin luvut ja kerrospaksuudet sekä kuormitus.

Pudotuspainolaitteella mitatun taipumakuvion eli taipumasuppilon avulla voidaan arvioida tierakenteen ominaisuuksia eri syvyyksillä. Lähellä kuormituslevyä mitatut taipumat kuvaavat päällysrakenteen yläosan ominaisuuksia ja taipumat etäällä kuormituslevystä alusrakenteen laatua. Taipumasuppilon avulla voidaan arvioida myös rakenteeseen syntyviä jännityksiä ja muodonmuutoksia. Esimerkiksi kuvassa 1 rakenteen 2 taipumasuppilo on kuormituslevyn lähellä loivempi kuin

rakenteen 1 taipumasuppilo. Voidaan päätellä, että rakenteella 2 päällysrakenteen yläosa on jäykempi kuin rakenteella 1, mistä syystä jännitykset päällysrakenteen yläosassa ovat rakenteella 2 pienempiä kuin rakenteella 1. Rakenteella 2 kaukana kuormituksesta mitattu taipuma on suurempi kuin rakenteella 1, joten rakenteen 2 alusrakenne on heikompaa kuin rakenteen 1 alusrakenne. Tien kestävän kannalta kriittisinä rasituksina pidetään sidotun kerroksen alapinnan vetomuodonmuutosta ja alusrakenteen yläpinnan puristusjännitystä. Jos esimerkin rakenteilla kriittisenä rasituksena on päällysteen alapinnan vetomuodonmuutos, rakenne 2 kestää kauemmin kuin rakenne 1.



Kuva 1: Kahden erilaisen tierakenteen taipumasuppilot

Kuormituslevyn keskeltä mitattu maksimitaipuma on eräänlainen koko tierakenteen ominaisuuksien summa. Sen perusteella ei pystytä erottamaan eri kerrosten ominaisuuksia, mistä syystä tierakenteeseen syntyvien jännitysten ja sitä kautta tierakenteen kestävyuden arviointi pelkän maksimitaipuman perusteella on vaikeaa.

Pudotuspainolaitteella mitatun taipumasuppilon avulla voidaan arvioida kantavuutta myös eri syvyyksillä tien pinnasta. Pintamoduuli etäisyydellä r kuormituslevyn keskikohdasta kuvaa likimääräistä kantavuutta samalla ekvivalenttisyvyydellä $z = r / \sqrt{1}$. Se lasketaan kaavasta:

$$E_0(r) = \frac{(1 - \mu^2) \cdot \sigma_0 \cdot a^2}{r \cdot d(r)} \quad (3)$$

missä $E_0(r)$ on pintamoduuli etäisyydellä r kuormituslevyn keskeltä, MN/m^2
 μ on Poissonin luku
 σ_0 on kosketuspaine, MN/m^2

a on kuormituslevyn säde, m

r on etäisyys kuormituslevyn keskeltä, m

d(r) on taipuma etäisyydellä r kuormituslevyn keskeltä, m

Eri kerrosten ominaisuuksia kuvaamaan on kehitetty myös taipumasuppilosta johdettuja tunnuslukuja. Niiden avulla pystytään arvioimaan tierakenteen kestävyyttä selvästi paremmin kuin pelkän maksimitaipuman avulla. Yleisesti käytetyt tunnusluvut ovat /2/:

$$SCI = D_0 - D_1 \quad (4)$$

eli taipumaero kahden ensimmäisen mittausanturin välillä (Surface Curvature Index),

$$BCI = D_3 - D_4 \quad (5)$$

eli taipumaero kahden viimeisen mittausanturin välillä (Base Curvature Index) ja

$$SP\% = 100 \cdot (D_0 + D_1 + D_2 + D_3 + D_4) / 5 \cdot D_0 \quad (6)$$

eli keskimääräisen taipuman osuus prosentteina maksimitaipumasta (Spreadability). Edellä olevat määritelmät perustuvat alunperin Dynaflect-laitteella tehtyihin mittauksiin, joissa taipuma D mitataan viidestä kohtaa: 0 cm, 30,5 cm, 61 cm, 91,5 cm ja 122 cm kuormituksen keskipisteestä mitattuna.

Surface Curvature Index, eli SCI kuvaa hyvin jännityksiä ja muodonmuutoksia, jotka aiheuttavat päällysteen väsymistä, koska se on kääntäen verrannollinen kaarevuussäteeseen /3/. Taipuma kuormituslevyn vieressä mitataan eri etäisyyksillä laitteen mallista riippuen. Yleisesti taipuma kahden ensimmäisen mittausanturin välillä ilmaisee mahdollisen heikkouden tien ylemmässä osassa. Mitä parempi on ylempi kerros, sitä pienempi on SCI /4/. SCI riippuu päällystepaksuudesta ja päällysteen E-moduulin (E_1) suhteesta sen alla olevan kerroksen E-moduuliin (E_2). Suhteellisen paksuilla päällysteillä SCI pienenee moduulisuhteen E_1/E_2 kasvaessa eli silloin, kun päällysteen jäykkyys kasvaa. Ohuilla päällysteillä SCI:n ja E_1/E_2 :n suhde riippuu voimakkaasti päällysteen paksuudesta; paksuuden kasvaessa SCI pienenee. Myös pystysuorat muodonmuutokset alusrakenteen yläpinnassa ovat verrannollisia SCI:iin /2/.

BCI:tä on USA:ssa käytetty pohjamaan ja kantavan kerroksen ongelmakohtien paikantamiseen. Eräissä osavaltioissa on BCI:lle asetettu joitakin mitatusta maksimitaipumasta riippuvia hyväksymisrajoja. Edelleen on havaittu yhteys BCI:n ja tien liikennöitävyyden välillä. /2/

SP% kuvaa päällysteen laattavaikutusta ja sen kykyä jakaa kuormitusta. Kun SP% on suuri, kuormitus siirtyy laajalle alalle ja alusrakenteen rasitukset ovat pieniä. Hyvin ohuiden päällysteiden laattavaikutus ei ole merkittävä, eikä SP%:a silloin voida käyttää. Kuormituksen leviävyys riippuu nimittäin kuormituslevyn säteen suhteesta päällysteen paksuuteen. /2/

Yksittäisetkin riittävän etäältä mitatut taipumat ovat käyttökelpoisia alusrakenteen kuvaajia. Ulommainen taipuma on jokseenkin riippumaton päällysrakenteesta ja siksi se kuvaa hyvin alusrakenteen kantavuutta /3, 2/. Esimerkiksi savipohjaisilla sorateilla pohjamaan kantavuus voidaan likimääräisesti laskea Kuab-pudotuspainolaitteessa käytettävän toiseksi viimeisen anturin (D 45) arvosta kaavalla 3, mikäli ylemmän kerroksen tarkkaa paksuutta ei tiedetä. Ruotsalaisen tutkimuksen /4/ mukaan kaksikerrosrakenteen alemman kerroksen kantavuuden ja D 45:n välillä on voimakas tilastollinen riippuvuus. Kahden taipuman, D 0:n ja D 45:n, erotuksella voidaan kuvata ylemmän kerroksen kantavuusominaisuuksia ja niiden suhteella taas ylemmän ja alemman kerroksen kantavuusominaisuuksien suhdetta /4/.

E-moduulien määrittämistä yksittäisten taipumien perusteella vaikeuttavat kimmo-ominaisuuksien jännitystilariippuvuudet, tien poikkileikkauksen vaikutus ja mahdolliset päällystehalkeamat.

2.2. Kantavuuden mittausmenetelmät

Kantavuuden mittaaminen palautuu laitteesta riippuen eri tavoilla aiheutetun taipuman mittaamiseen. Tällä hetkellä maassamme käytetään yleisesti kolmea erityyppistä menetelmää.

Levykuormituslaitteella mitataan tien pinnan painumaa määräsuuruisella voimalla kuormitetun levyn alla. Kokeessa levyn kuormitusta nostetaan 10 kN:n välein 0 kN :sta 60 kN:iin kaksi eri kertaa. Kantavuusarvo (E_{kant}) lasketaan yleensä sen painuman perusteella, joka on saatu suurimmalla käytetyllä kuormalla toisella kuormituskerralla.

Benkelman-palkilla mitataan 50 kN:n pyöräpainon aiheuttama tienpinnan taipuma kuorma-auton kaksoispyörän välistä. Benkelman-palkilla mitattaessa koe voi olla joko staattinen tai dynaaminen. Yleisimmin käytetään staattista menetelmää, jossa auto pysyy paikallaan, kun taipuma luetaan. Dynaaminen Benkelman-koe pyrkii kuvaamaan hitaan liikenteen aiheuttamia taipumia tiessä.

Pudotuspainolaite on dynaaminen kantavuudenmittauslaite, joka aiheuttaa tiehen kuormitukseltaan ja ajaltaan samaa suuruusluokkaa olevan rasituksen kuin liikkuva kuorma-auto. Kuormitus saadaan aikaan pudottamalla kuorma vaimentimelle, josta

kuormitus siirtyy kuormituslevyn kautta tien pintaan. Kuormitusmassan suuruutta ja pudotuskorkeutta voidaan muuttaa. Kuormituksen aiheuttama taipuma voidaan mitata seismisillä antureilla eri etäisyyksillä kuormituslevystä. Keskeltä levyä mitatusta taipumasta (D_0) lasketaan tierakenteen kantavuusarvo. Koska kuormitus aika on lyhyt, saadaan entistä parempi kuva rakenteen kimmoisesta käyttäytymisestä.

Kantavuusmittauksiin liittyy aina pisteittäistä hajontaa, joka riippuu myös käytetystä mittausmenetelmästä. Eräässä kokeessa /4/ pudotuspainolaitteella tehdyt kantavuusmittaukset toistettiin samanlaisina, jotta saataisiin selville tulosten luotettavuus. Taipumien keskiarvot muuttuivat ensimmäisestä mittauksesta 8 - 9%. Yksittäisissä pisteissä poikkeamat voivat olla merkittävästi suurempia.

Kantavuus lasketaan mittauslaitteesta riippumatta samalla kaavalla (kaava 1), johon sijoitetaan käytetyt kuormitusarvot. Levykuormituskokeessa käytetty kuormitus on 60 kN ja levyn säde 0,15 m. Benkelman-kokeessa kaksoispyörän kuorma on 50 kN ja rengaspaine n. 707 kN/m², jolloin ympyrän muotoisen kuormitusvälikappaleen arvo on 0,15 m. Pudotuspainolaitteen kuorma saadaan mittaustietona (se on lähellä 50 kN:a) ja levyn säde on 0,15 m. Vertailua varten taipuma voidaan muuntaa vastaamaan 50 kN:n kuormitusta suoralla interpoloinnilla ilman suurempaa virhettä. Eri laitteilla mitattuja kantavuuksia verrattaessa on otettava huomioon, että pudotuspainolaitteen kuormitustapa on luonteeltaan muista poikkeava, mistä syystä määritetyt kantavuudet ovat suurempia kuin muita laitteita käytettäessä varsinkin AB-teillä.

Vaikka kantavuusarvo ja taipuma ovat lähinnä suhteellisia arvoja, niiden avulla saadaan yleensä luotettava kuva tien kestävydestä ja tiessä tapahtuneista muutoksista /3/. Edellytyksenä on, että vertailtavien teiden rakenne on saman tyyppinen ja käytettävissä on riittävästi aikaisempaa havaintoaineistoa, jonka avulla voidaan kokemukseräisesti arvioida kuormituskestävyyttä. Maksimipainuman tai -taipuman avulla lasketun kantavuuden käyttö suunnittelussa voi tapahtua mallilla, joka ottaa huomioon mittausten hajonnan /2/:

$$(W + 2\sigma) \cdot f \cdot C \quad (7)$$

missä W on keskiarvo ensimmäisen mittaustuloksen kohdalla luetuista painumista (tai yleensä maksimitaipumista)
 σ on mittausten keskihajonta
 f ja C ovat säätökertoimia ympäristölle, mittauksen ajankohdalle ja vuodenaikalle.

Kaavassa 7 olevalle hajonnan σ kertoimelle on aiemmin esitetty arvoa 1 /3/.

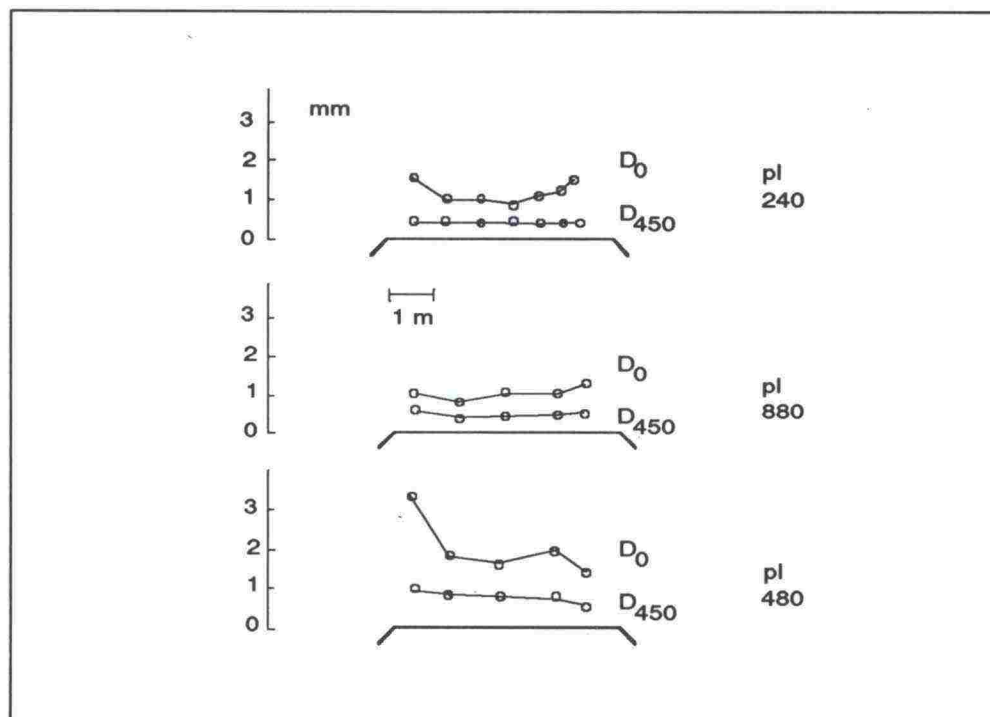
2.3. Kantavuusvaihtelu

2.3.1. Tierakenteen vaikutus kantavuuteen

Tierakenteen kantavuus vaihtelee sekä ajallisesti että mittauspisteiden sijainnin mukaan. Lisäksi kantavuusmittausten luonteeseen liittyy aina tietty tilastollinen hajonta.

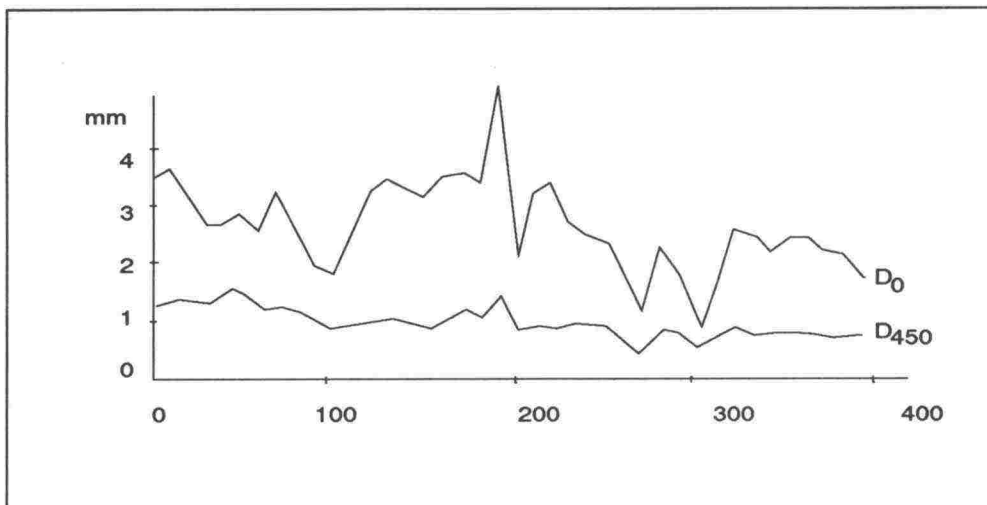
Tien reunalla on voimakas vaikutus kantavuuteen. Läheltä tien reunaa mitatut kantavuudet ovat alhaisempia kuin tien keskeltä mitatut kantavuudet (kuva 2) /4/. Suurimpana syynä on erilainen jännitystila, sillä luiskan lähellä sivutuki puuttuu yhdeltä sivulta. Sivutukeen vaikuttavat pientareen leveys, luiskan kaltevuus ja penkereen korkeus. Lisäksi erilaiseen kantavuuteen tien poikkisuunnassa vaikuttavat erot kosteusolosuhteissa. Piennar ja luiska läpäisevät paremmin vettä kuin tiivis päällyste. Työnaikainen rakenteen tiivistäminen ja liikenteen aiheuttama tiivistyminen on myös erilaista eri kohdissa poikkileikkausta. Kun luiskakaltevuus ylittää 1:4:n, kaltevuuden muutos ei vaikuta merkittävästi kantavuuteen. Kapeilla teillä, missä luiskakaltevuudet ovat 1:1 - 1:2, tien reunoilla on suuri vaikutus kantavuuteen. Noin metrin päässä tien reunasta taipuma voi olla 1,5 -kertainen keskeltä tietä mitattuun taipumaan verrattuna /5/.

Sivusuuntaisen vaihtelun vaikutus kantavuusmittauksissa häviää, kun mittaukset tehdään aina ulommaisesta raideurasta. Jos sama henkilö suorittaa mittaukset, voidaan mittauslinjasta poikkeaminen olettaa suhteellisen vähäiseksi /4/.

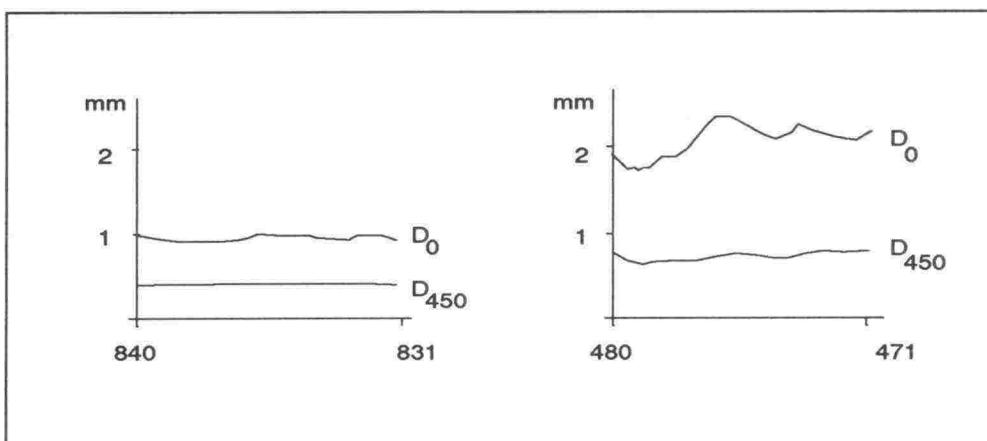


Kuva 2: Pudotuspainolaitemittauksen tuloksia kolmessa eri poikkileikkauksessa eräältä Y1G -tieltä Ruotsissa. Tien alusrakenne on savea. (Y1G vastaa soratien pintausta)/4/

Tien pituussuuntainen kantavuuden vaihtelu voi olla merkittävän suurta varsinkin sorateilla /4/. Kerrospaksuuksien ja -materiaalien vaihtelu johtaa eroihin kantavuuksissa samoin kuin materiaalien epähomogeenisuus (kuvat 3 ja 4). Sorateilla on saatettu ajaa erilaista materiaalia eri paikkoihin tietä kulloisenkin kunnossapitotarpeen mukaan. Pisteittäiset kantavuusvaihtelut voivat myös johtua karkeampien aineiden esiintymisestä pohjamaassa. Esimerkiksi suurten kivien olemassaolo ei yleensä ilmene maalajimäärityksissä /6/.



Kuva 3: Mittaustulokset 19.10.-79 ruotsalaiselta soratieltä, missä pohjamaa on savea. Mittaukset on tehty 10 m:n välein /4/.



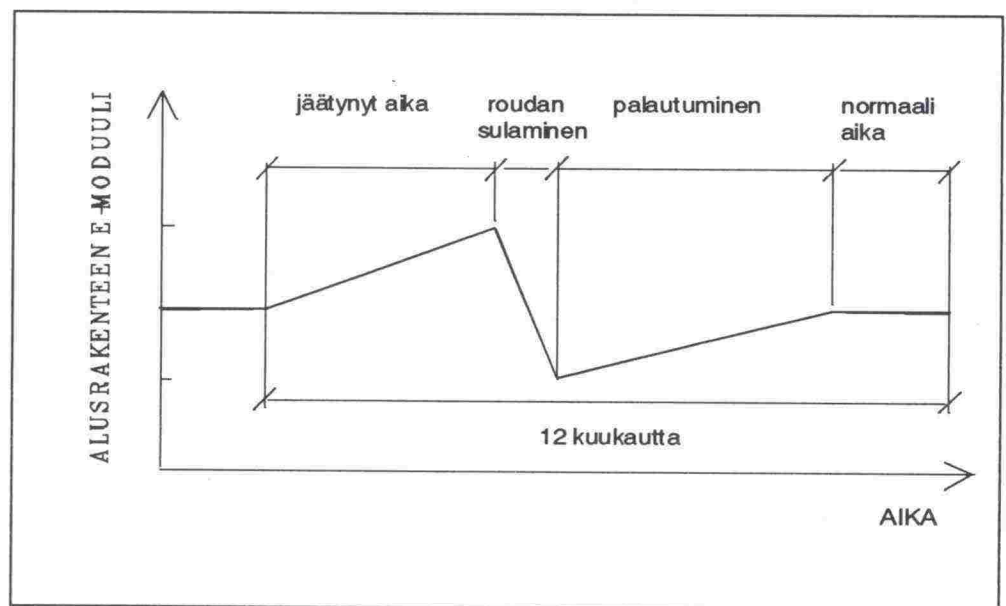
Kuva 4: Mittaustulokset kahdelta ruotsalaiselta koealueelta 2.7.-80. Tie on soratie (Y1G), missä pohjamaa on savea. Mittaukset on tehty 45 cm:n välein /4/.

2.3.2. Ilmastotekijöiden vaikutus kantavuuteen

Kantavuuteen vaikuttavat ilmastotekijät ovat lämpötila (routiminen) ja sade /7/. Lämpötila vaikuttaa bitumilla sidottujen kerrosten jäykkyyteen ja tien routimiseen. Sen sijaan lämpötilan muutosten aiheuttamia jännityksiä ei yleensä oteta huomioon joustavilla päällysrakenteilla. Sitomattomiin kerroksiin lämpötila ($>0^{\circ}\text{C}$) ei juurikaan vaikuta.

Maan routaantuminen ja roudan keväinen sulaminen aiheuttavat kantavuudelle selvän vuodenaikavaihtelun (kuva 5). Kantavuuden lasku keväällä on seurausta routimisen aiheuttamasta alusrakenteen ja osittain myös sitomattomien

päällysrakennekerrosten tiiviyden pienenemisestä ja kosteuden kasvamisesta sekä huokosveden ylipaineesta. Routimisen vaikutus kantavuuteen voidaan selittää tierakenteen jäätymis- ja sulamismekanismien avulla. Routivan alusrakenteen tilavuus kasvaa silloin, kun se jäätyy. Tilavuuden kasvu merkitsee alentunutta tiiviyttä ja kasvanutta vesipitoisuutta, mikä johtaa heikkoon kantavuuteen. Heikon kantavuuden takia alusrakenne alkaa sulamisen edistyessä painua kokoon liikenteen ja päällysrakenteen painon vaikutuksesta. Vesi purkautuu asteittain suulaan vapaaseen tilaan, eli ylöspäin, koska sisäluiskan kohdalla oleva tierakenne sulaa yleensä myöhemmin kuin ajoradan kohdalla. Kosteuden kasvu heikentää myös sitomattomien päällysrakennemateriaalien kantavuusominaisuuksia.



Kuva 5: Alusrakenteen kimmomoduulin periaatteellinen vaihtelu /8/

Heikoin kantavuus saavutetaan tavallisesti silloin, kun alusrakenne on juuri sulanut. Kylminä vuosina, jolloin routa tunkeutuu syvälle, taipumahuippu saavutetaan muutamaa päivää ennen kuin sulaminen on kokonaan loppunut, koska ensin sulanut maa-aines on jo ehtinyt jonkin verran tiivistyä ja parantaa kantavuutta. Heikko aika keväällä kestää 1,5:stä 2:een kuukautta /9, 10/. Pohjamaan kantavuus laskee joskus vielä heinäkuussa. Syksyllä kantavuuksien keskiarvot eivät juurikaan muutu /4/.

Roudan sulamisvaiheen kantavuus (ilmaistuna taipumina) verrattuna syksyiseen kantavuuteen riippuu seuraavista tekijöistä /11/:

- suhteellinen taipumaero kasvaa merkittävästi alusrakenteen routimisherkkyyden kasvaessa
- suhteellinen taipumaero kasvaa, kun mitattu kevättaiipuma kasvaa
- suhteellinen taipumaero kasvaa lievästi edeltävän talven pakkasmäärän kasvaessa
- suhteellinen taipumaero kasvaa lievästi routajaksojen lisääntyessä

- suhteellinen taipumaero kasvaa lievästi roudan maksimisyvyyden kasvaessa

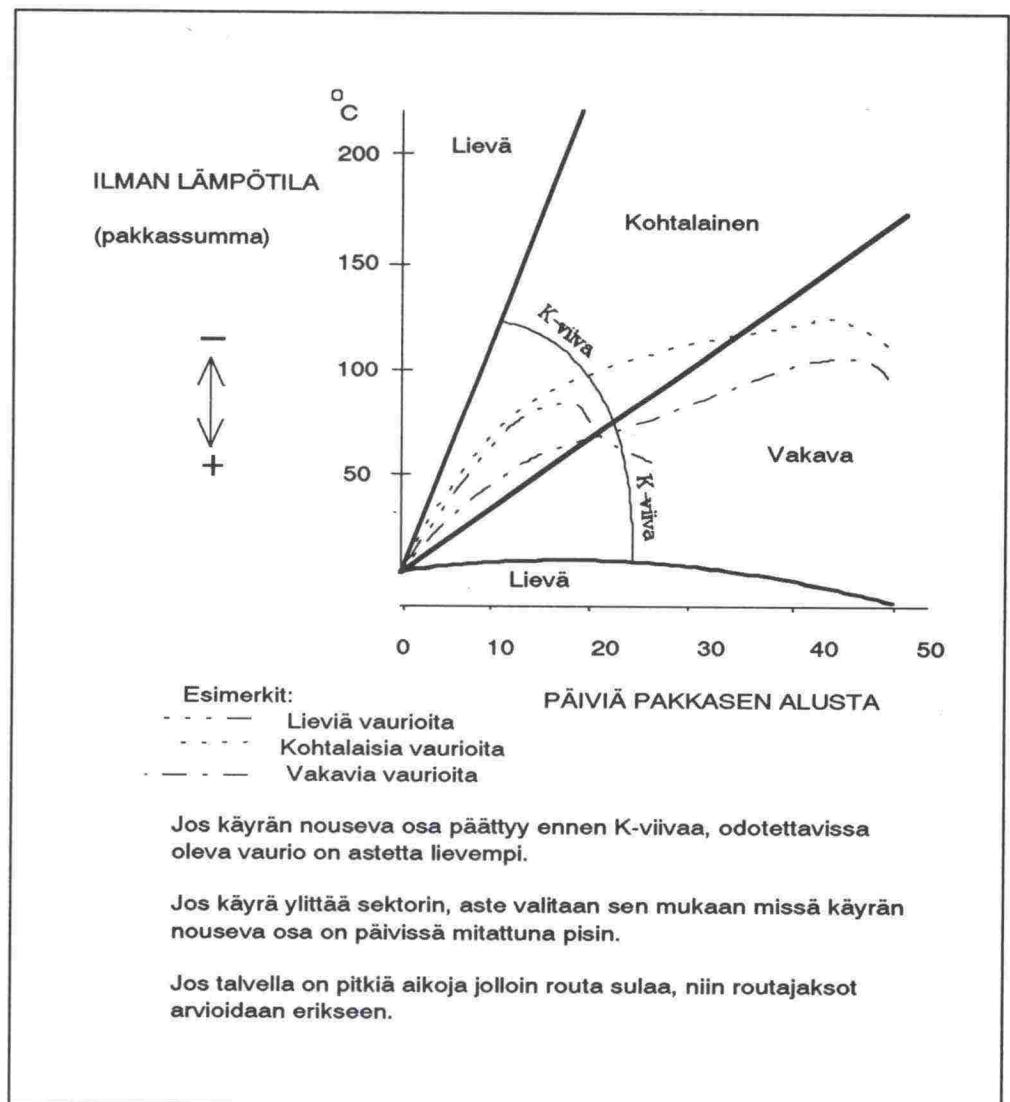
Samalla tavalla havaittiin seuraavia suuntauksia kantavuuden palautumisajassa /11/:

- aika lyhenee roudan maksimisyvyyden kasvaessa ¹⁾
- aika lyhenee lievästi edeltävän talven pakkasmäärän kasvaessa
- aika pitenee lievästi, kun routimisherkyys kasvaa
- aika pitenee lievästi, kun mitattu kevättaipuma kasvaa
- aika pitenee lievästi routajaksojen lisääntyessä
- aika pitenee lievästi suhteellisen taipumaeron kasvaessa

¹⁾ Roudan maksimisyvyys on yhteydessä maalajien karkeuteen siten, että karkearakeisissa maalajeissa routa tunkeutuu syvemmälle kuin hienoissa maalajeissa. Nopea lujisuuden palautuminen syvästä roudasta huolimatta selittyy sillä, että raekoon kasvaessa myös vedenläpäisevyys kasvaa. Roudan sulaessa karkea rakenne kuivuu nopeammin /11/.

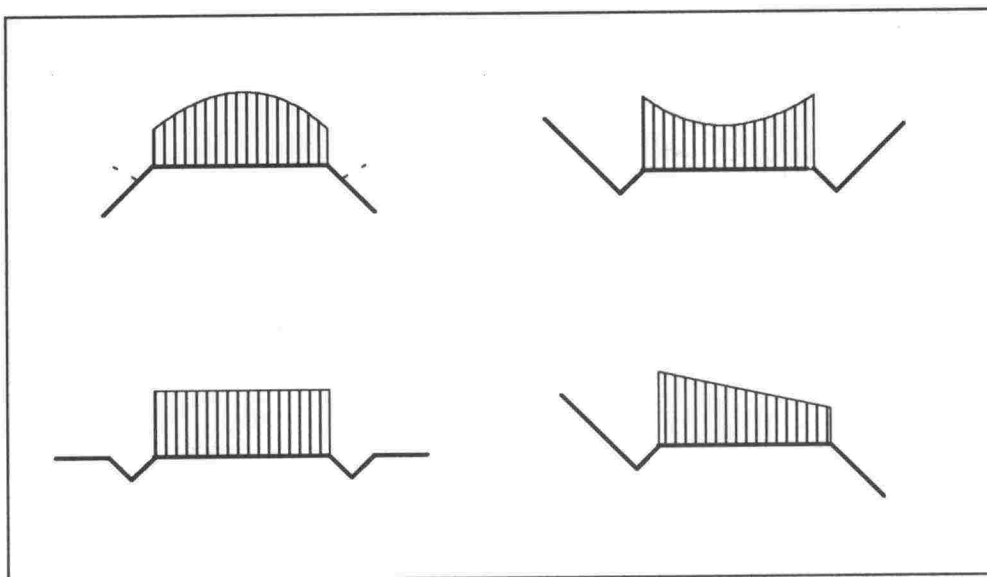
Korrelaatiot olivat kuitenkin yleensä heikkoja, mutta vaikutusten suunta lienee oikea. Se, että pelkällä pakkasmäärällä ei ole merkittävää vaikutusta kevätkantavuuden suuruuteen, on havaittu myös kanadalaisessa tutkimuksessa /11/. Selityksenä oli, että kaikki tutkitut koealueet kokevat vuosittaisen routakauden. Aina, kun on pakkaskausi, löytyy myös riittävästi vettä, jotta routanousu ja kevätheikkeneminen pääsevät tapahtumaan /12/.

Lämpötilan kehittymistavalla on havaittu olevan vaikutusta tien vaurioitumiseen (=päälystehalkeiluun). Pakkasmäärän summakäyrän ollessa loiva (hidas routa), vauriot ovat vakavampia kuin jyrkkään kohoavan summakäyrän tapauksessa (nopea routa). Leutojen talvien jälkeen tien yläosassa, missä liikennekuormitus eniten vaikuttaa, on suuri määrä maan jäätyessä sitoutunutta vettä (kuva 6) /13/. Kovina talvina tien yläosa jäätyy niin nopeasti, että se jää suhteellisen kuivaksi.



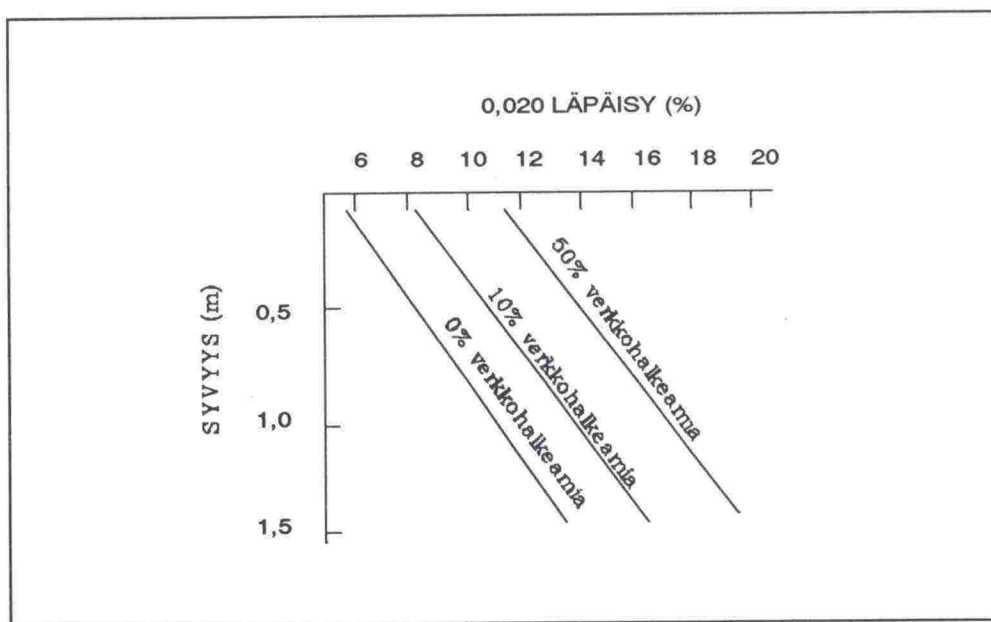
Kuva 6: Pakkasmäärästä riippuva tien vaurioituminen /13/

Tien poikkileikkauksen routanousulla on joitakin tyypillisiä muotoja (kuva 7) /14/. Routanousu on suuri siellä, missä pakkanen voi esteettä vaikuttaa syvälle. Hyvä esimerkki suuresta routanoususta on pengeri. Lumen eristävä vaikutus näkyy selvästi penkereen luiskissa. Toisaalta routanousu on suuri myös sellaisissa paikoissa, missä vettä on helposti saatavilla kuten tien reunaosilla leikkauksissa.



Kuva 7: Tyypillisiä routanousun muotoja erilaisilla poikkileikkauksilla /14/.

Hienoaineksen määrä vaikuttaa tierakenteen routimisominaisuuksiin. Koska routiminen aina heikentää kantavuutta, voidaan päätellä, että hienoainespitoisuudella on merkittävä vaikutus kantavuuteen. Tierakenteen materiaalien alle 0,020 mm:n rakeiden määrän lisääntyessä tien pinnan taipumat kasvavat (kantavuus laskee) ja verkkohalkeilu lisääntyy. Kullakin syvyydellä tien pinnasta on olemassa kriittinen hienoainespitoisuus, jonka ylittyminen aiheuttaa tietyn routavaikutuksen ja edelleen tietynsuuruisen taipuman kasvun keväisin (kuva 8). Yli 1,1 metrin syvyydellä olevien materiaalien hienoainespitoisuudella ei ole merkittävää vaikutusta taipumiin eikä liioin muilla materiaaliominaisuuksilla /12/.



Kuva 8: Keskimääräiset hienoainespitoisuudet eri syvyyksillä tien pinnasta teissä, joissa on ilmennyt eriasteista päällystehalkeilua /12/.

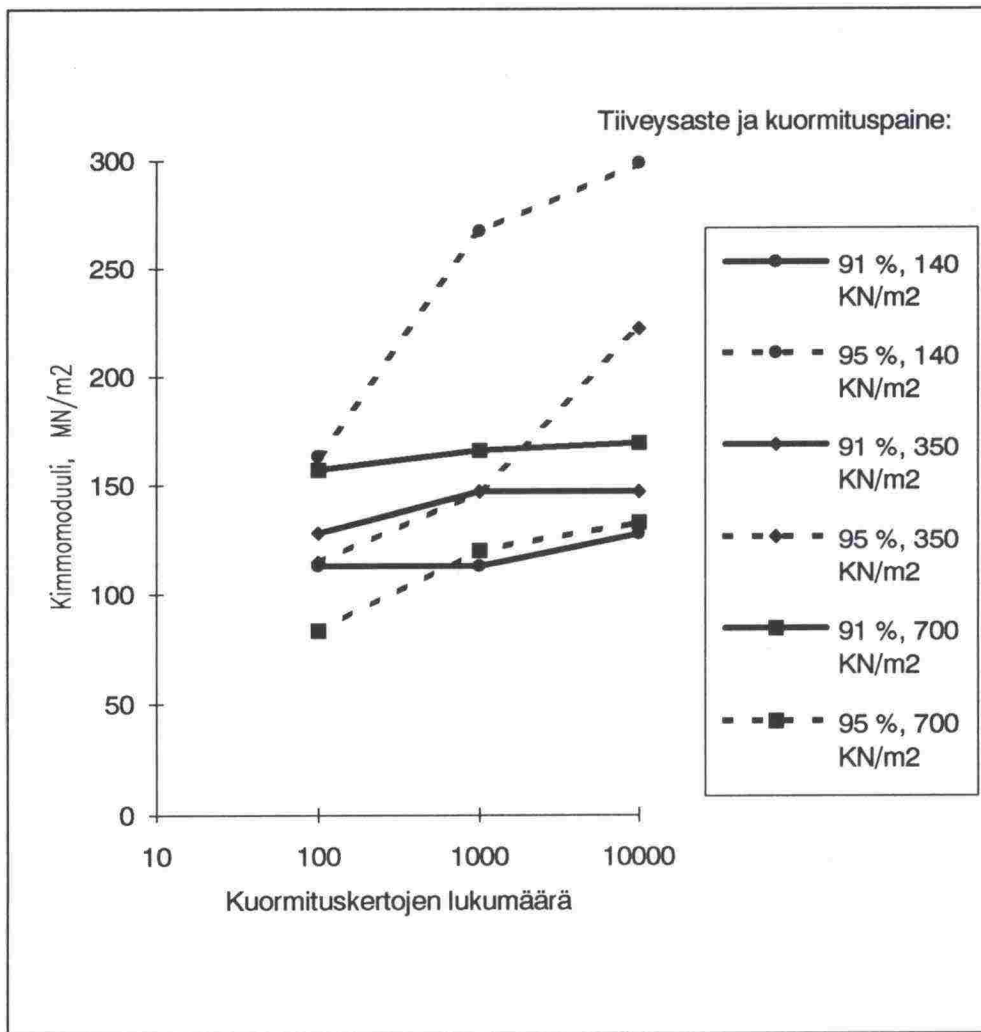
Kuva 8 pohjautuu laajaan tutkimusaineistoon Alaskassa (ilmasto ja tierakenne ovat Suomen kaltaisia). AB-päällysteen paksuus oli 25 ... 125 mm, kantava kerros oli soraa ja jakavan kerroksen 0,075 mm:n läpäisy jäi alle 16%:n lähempänä kuin 30 cm päällysteestä. Pohjamaa oli kaikissa tutkituissa pisteissä ei-plastista silttiä. 0,020 ja 0,075 mm seulojen läpäisyprosenttien suhde oli likimäärin 0,6 kaikilla tutkituilla maalajinäytteillä /12/.

Sade sinänsä ei vaikuta päällystettyjen teiden kantavuuteen, mutta jos vettä pääsee tierakenteeseen niin paljon, että pohjamaan kosteuspitoisuus nousee huomattavasti, koko rakenne saattaa menettää kantokykynsä. Vesi pääsee rakenteeseen päällysteen halkeamista, reunoista ja läpäiseviltä pinnoilta, kuten sorapientareista ja ojien sisäluiskista /7/. Syksyn ja talven sademäärien perusteella ei ole voitu selittää keväällä tapahtuvaa rakenteen vaurioitumisen määrää. Sateet eivät ilmeisesti kasvata vesipitoisuutta suoraan niiden määrän tai rankkuuden suhteessa, vaan ylimääräinen vesi haihtuu tai valuu pohjavedeksi /13, 12/. Sateilla on toisaalla kuitenkin havaittu olevan merkittävä vaikutus dynaamisiin E-moduuleihin ja siten myös kesäkantavuuksiin. Heikoin pohjamaan moduuli saavutetaan joskus vasta 3 viikon kuluttua sateesta. Tavallinen väli on 12 - 21 päivää /15/.

Sateet vaikuttavat pohjaveden korkeuteen, jonka vaihtelu voi olla suurtakin. Pohjaveden asemalla on todettu olevan suuri vaikutus myös kantavan ja jakavan kerroksen kantavuusominaisuuksiin. Ruotsissa tehdyssä kokeessa mitattiin toistuvien kuormitusten avulla pohjaveden aseman vaikutusta tierakenteen kestoikään ja samassa yhteydessä tehtiin mittauksia pudotuspainolaitteella. Koerakenteen, jossa kantava kerros oli soraa, kestoikä lyheni toistuvien kuormitusten vaikuttaessa 1/4 ... 1/10:een osaan aikaisemmasta arvostaan, kun pohjavesi nostettiin -70 cm:stä -30 cm:iin (tien pinnasta). Kun pudotuspainolaitte-mittausten tulosten perusteella laskettiin rakenteen teoreettiset jännitykset ja laskennalliset kestoajat, arvioitiin, että kestoikä edellä kuvatussa tilanteessa olisi lyhentynyt vain noin 30%. Kalliomurske oli vähemmän herkkä pohjaveden asemalle kuin soramurske. Kalliomurskeen osalta vastaava kestoajan lyhenemä oli noin 20%. Jos lähdetään tilanteesta, jossa pohjavesi on äärettömän syvällä ja se nostetaan -70 cm:iin tien pinnasta, analyttisestikin määritetty tierakenteen kestävyys on enää vain murto-osa lähtöarvostaan /16/.

2.3.3. Kuormitusten ja tiiviiden vaikutus kantavuuteen

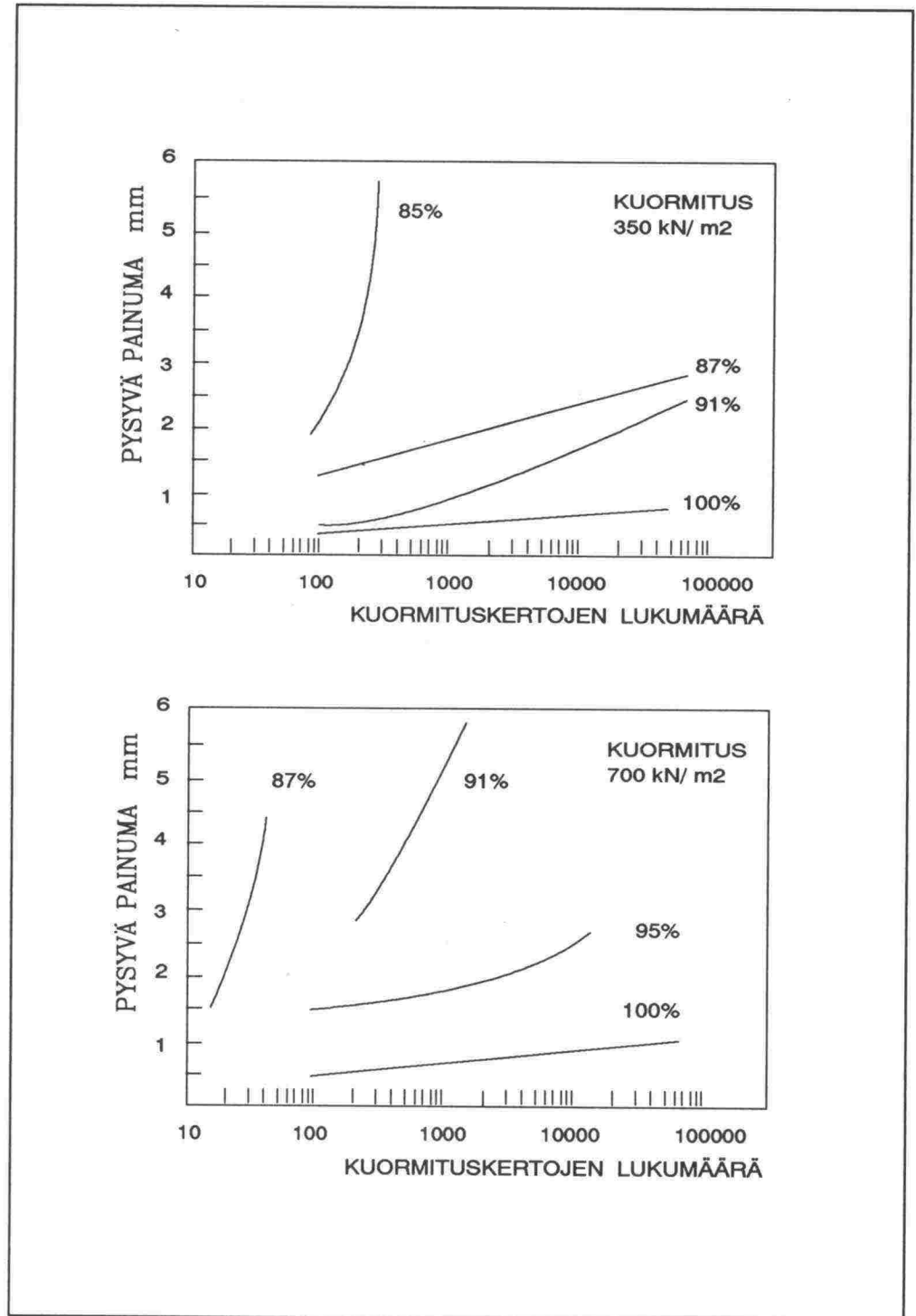
Voidaan osoittaa, että kuormituskertojen lisääntyessä sitomattomien materiaalien kimmoinen muodonmuutos pienenee, eli E-moduuli kasvaa, kun materiaali tiivistyy (kuva 9).



Kuva 9: E-moduulin riippuvuus kuormituksesta eri tiiveysasteilla /17/

Tiiveysasteen noustessa yli 95%:n leikkauslujuus alkaa kasvaa hyvin voimakkaasti ja samalla myös materiaalin E-moduuli kasvaa (katkoviiva kuvassa). E-moduulin arvo on siis paitsi jännitystilän myös suhteellisen tiiviyden ja kuormitusten lukumäärän funktio. Jos tiiveysaste on korkea, hyvin suuret toistuvat kuormitukset saattavat heikentää materiaalia, jolloin sen E-moduuli laskee (murtojujuus ylittyy ja jäännöslujuus on alle alkuperäisen arvon). Tästä syystä huonommalla alkutiiviydellä (91%) voidaan saavuttaa suurempi E-moduuli kuin hyvällä tiiveysasteella (95%).

Kokonaismuodonmuutos kasvaa kuitenkin aina kuormituskertojen lisääntyessä, dynaamisen kuorman kasvaessa tai tiiveysasteen pienentyessä, sillä kokonaismuodonmuutokseen kuuluu kimmoisen muodonmuutoksen lisäksi myös pysyvä muodonmuutos (kuva 10). Toistuvien kuormitusten aiheuttama pysyvä muodonmuutos riippuu kuormituspainesta ja tiiveysasteesta. Kuormituksen suuruudesta riippumatta pysyvät painumat kasvavat aina voimakkaasti, kun tiiveysaste on alle 95% /17/.



Kuva 10: Pysyvä painuma kahdella eri kuormituksella kuormituskertaluvun funktiona. Käyrät edustavat eri tiiviysasteita /17/.

2.4. Laskennallinen kantavuus

2.4.1. Kerrosten E-moduulit

Laskennallisen kantavuuden määrittäminen perustuu kimmoteoriaan. Materiaalien kimmomoduulien, Poissonin lukujen ja kerrospaksuuksien avulla arvioidaan koko rakenteen kantavuutta. Materiaalien oletetaan olevan homogeenisia, isotrooppisia, sivusuunnassa äärettömiä ja noudattavan Hooken lakia. Niiden omaa painoa ei yleensä oteta huomioon. Teoreettisten oletusten ja materiaalien käyttäytymisen välillä saattaa todellisuudessa olla suuriakin eroja /1, 26/.

Käytännön ongelman muodostavat tarvittavien lähtöparametrien (kimmomoduuli ja Poissonin luku) määrittäminen. Nämä ovat tienrakennusmateriaaleilla vuodenajan, vesipitoisuuden, tiiviyden, jännitystilän ym. tekijöiden mukaan muuttuvia suureita. Asfalttipäällysteillä lämpötila ja kuormituksen kesto aika vaikuttavat olennaisesti eo. suureisiin. Parannettavilla teillä kerrosten kimmomoduulit voidaan määrittää nopeasti pudotuspainolaitteella mitattujen etäistaipumien avulla. Laboratorio-olosuhteissa sitomattomien materiaalien kimmomoduulien määrittäminen tapahtuu parhaiten dynaamisilla kolmiakselilaitteilla, joissa voidaan käyttää haluttua jännitystilaa ja kosteutta. Kuormitusaika voidaan asettaa vastaamaan liikennekuormitusta, millä myös on merkitystä kimmomoduulin arvoon.

Dynaaminen kimmomoduuli M_r määritetään yleensä deviatorisen jännityksen $(\delta_1 - \delta_3)$ ja palautuvan muodonmuutoksen (ϵ_0) suhteena:

$$M_r = \frac{\delta_1 - \delta_3}{\epsilon_0} \quad (8)$$

Deviatorinen jännitys (= suurimman ja pienimmän pääjännityksen erotus) muuttuu tierakenteessa syvyyden mukaan. Se riippuu kerrosten paksuuksista, kerrosten E-moduuleista ja niiden suhteista, kuormituksen suuruudesta ja tien geometriaan liittyvistä muuttujista /3/.

Kokonaistaipumasta kuormituslevyn keskellä suuri osa aiheutuu alusrakenteesta. Alusrakenteen epälineaarisuus voidaan ottaa huomioon laskemalla sen E-moduuli kokeellisesti määritetyllä yhtälöllä /1, 25/:

$$E_m = C \cdot (\sigma_z / \sigma_v)^n \quad (9)$$

missä E_m on alusrakenteen E-moduuli, MN/m²
C ja n ovat vakioita
 σ_z on normaali jännitys syvyydellä z, MN/m²
 σ_v on vertailujännitys = 0.1 MN/m²

Vakiot C ja n ovat epälineaarisuuden kuvaajia. Jos $n = 0$, niin materiaali on lineaarisesti kimmoista ja $n:n$ kasvaessa epälineaarisuus tulee yhä selvemmäksi /2/.

Alusrakenteen jännitystila riippuu pyöräpainon lisäksi mm. päällysrakenteen paksuudesta. Päällysrakennepaksuuden vähetessä deviatorinen jännitys alusrakenteen yläpinnassa kasvaa, mikä alentaa koheesiomaalajin kimmomoduulia merkittävästi, sillä koheesiomaalajien kimmomoduuli pienenee jännitystilan (kuormituksen) kasvaessa. Pohjamaan, joka yleensä on koheesiomaata, E-moduulin riippuvuutta deviatorisesta jännityksestä kuvataan seuraavalla mallilla /2/:

$$M_R = K_1 \cdot \sigma^{-n} \quad (10)$$

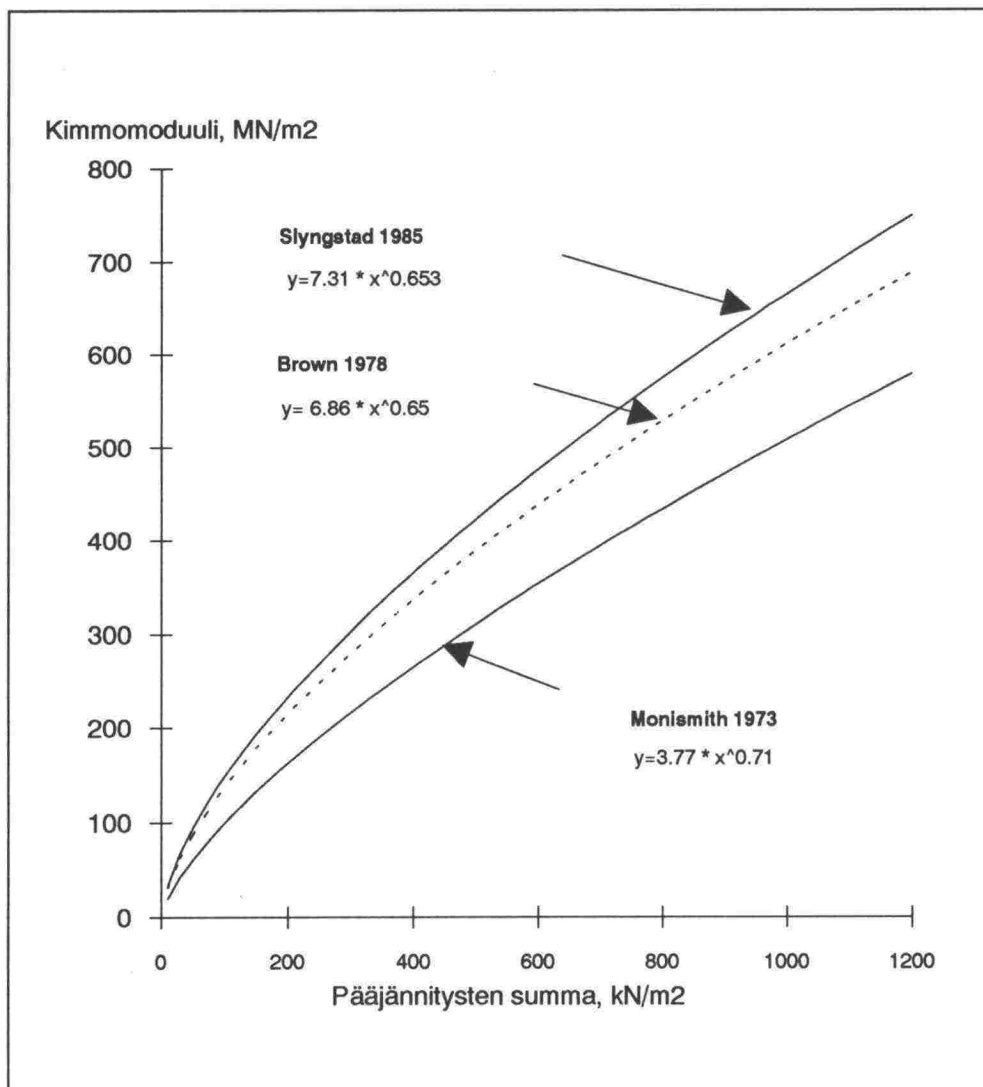
missä M_R on materiaalin kimmomoduuli
 K_1 on vakio
 n on materiaalivakio $< 1,0$
 σ on deviatorinen jännitys $= \sigma_1 - \sigma_3$

Sitomattomat päällysrakennemateriaalit ovat kitkamaalajeja, joiden kimmokerroin kasvaa jännitystilan (kuormituksen) kasvaessa. Kitkamaalajin kimmomoduulin riippuvuus jännitystilasta ilmaistaan yleensä seuraavalla kaavalla /2/:

$$M_r = K_2 \cdot \Theta^m \quad (11)$$

missä M_r on kimmomoduuli
 K_2 ja m ovat materiaalivakioita
 Θ on pääjännitysten summa (jännitysinvariantti) $= \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$

Eri maissa tutkijat ovat saaneet hieman toisistaan poikkeavia riippuvuuksia kantavan kerroksen E-moduulin ja jännitystilan välille (kuva 11).



Kuva11: Kitkamaata olevien kantavan kerroksen materiaalien E-moduulin riippuvuus jännitystilasta /18, 19/

Tyypillisillä tierakenteilla pääjännitysten summa on sitomattomassa kantavassa kerroksessa noin 140 - 280 kN/m² ja jakavassa kerroksessa noin 70 kN/m² /22/. Pääjännitysten summa riippuu mm. päällysteen paksuudesta ja pyöräpainosta. Jos päällyste on paksu tai pyöräpaine pieni, jännitystila on sitomattomissa kerroksissa alhainen, mistä syystä myös kimmomoduulit ovat alhaisia.

Kitkamaiden kimmomoduulia voidaan myös kuvata deviatorisella jännityksellä ($\sigma_1 - \sigma_3$) tai sivupaineella /16, 18/. Deviatorisen jännityksen ja norjalaisen kantavan kerroksen materiaalin E-moduulin välille on löydetty seuraava yhteys /18/:

$$E \text{ (MPa)} = 0,7 \cdot \sigma_d \text{ (kPa)} \quad (12)$$

Suppeusluku (Poisson) riippuu vahvasti σ_1 :n ja σ_3 :n suhteesta /18/:

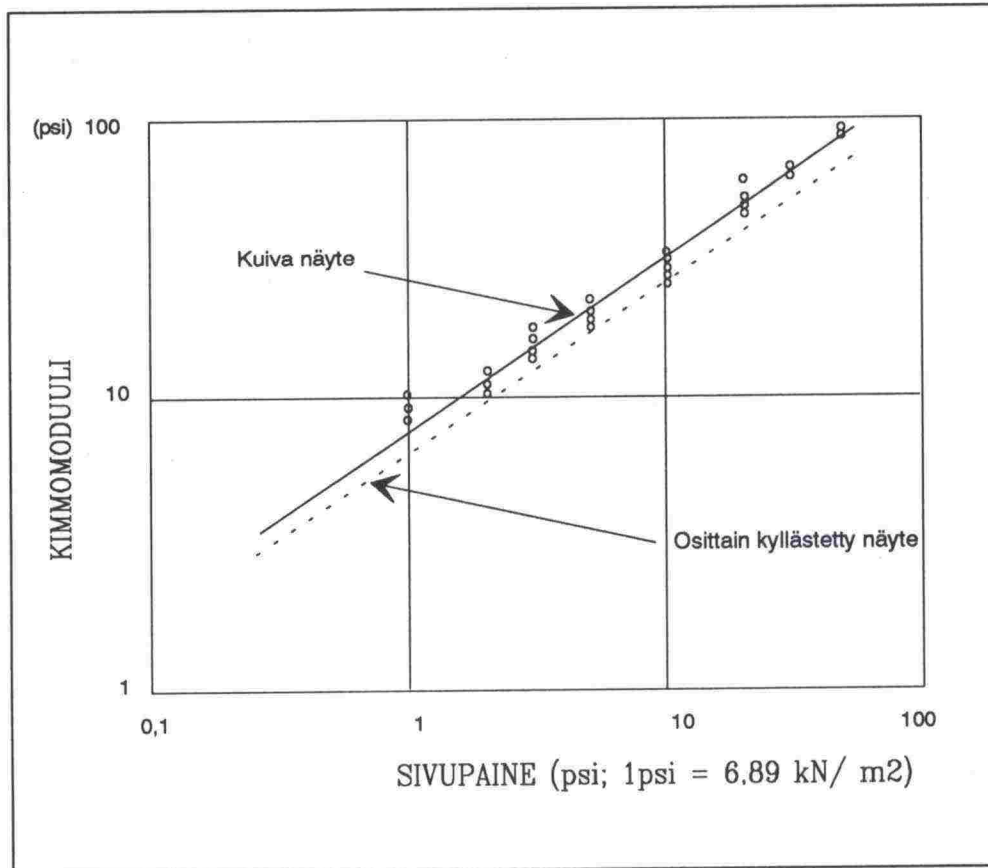
$$\mu_f = 0,13 + 0,05 \cdot (\sigma_1/\sigma_3) \quad (13)$$

$$\mu_b = 0,016 + 0,08 \cdot (\sigma_1/\sigma_3) \quad (14)$$

Tässä μ_f = jakavan kerroksen suppeumaluku
 μ_b = kantavan kerroksen suppeumaluku
 σ_1 ja σ_3 = suurin ja pienin pääjännitys

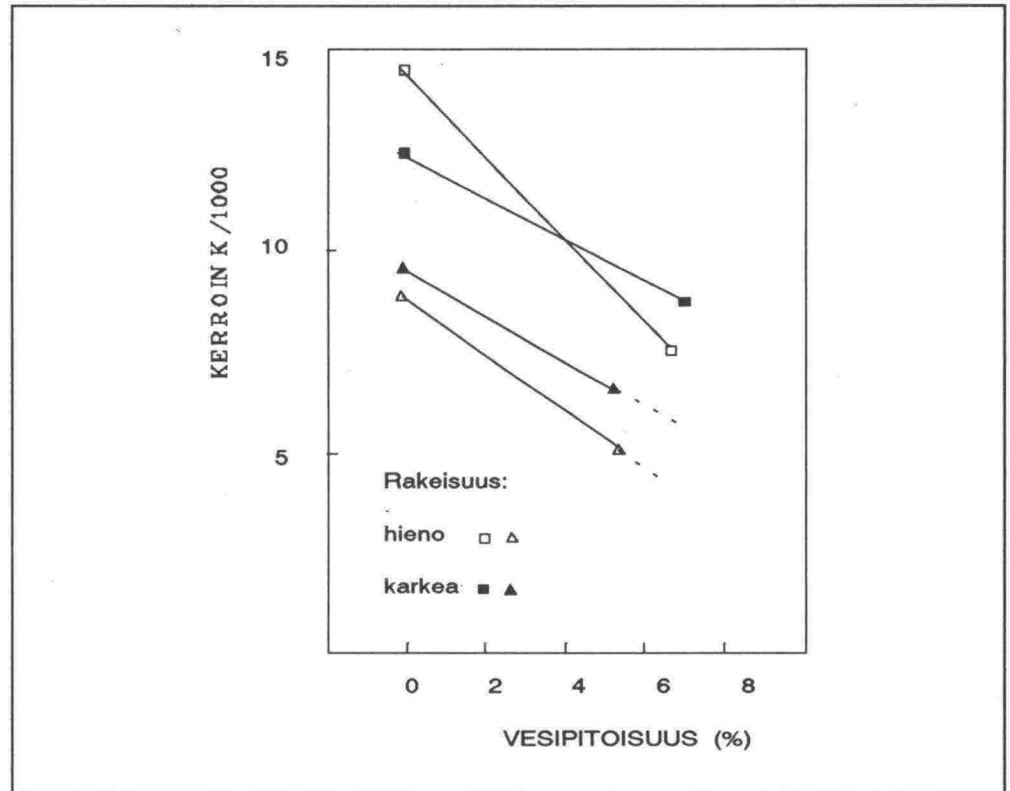
Brownin mukaaan kitkamaiden Poissonin luku riippuu deviatorisen jännityksen suhteesta keskimääräiseen normaalijännitykseen. Laskelmien yksinkertaistamiseksi voidaan kitkamaalajien Poissonin lukuna kuitenkin ilman suurempaa virhettä käyttää arvoa 0,3/19/.

Kosteus ja tiiviys vaikuttavat kitkamaalajien kimmomoduuleihin. Soran ja murskeen kriittinen kyllästysaste on noin 80 - 85 %. Tätä suuremmilla arvoilla materiaalien kimmomoduulit alenevat merkittävästi, ja samalla materiaalien jännitystilariippuvuus vähenee. Tiiviyn lisääntyessä kitkamaalajien kimmomoduulit yleensä kasvavat /21, 22/. Hics on kuitenkin osoittanut, että soran E-moduuliin vaikuttaa enemmän sivupaineen taso kuin kyllästysaste (kuva 12). Kuvasta on huomattava log-log -asteikko ja se, että verrataan vain kuivaa ja osittain kyllästettyä näytettä. E-moduuli laskee suoraviivaisesti vesipitoisuuden kasvaessa eikä mainittavasti pienene, vaikka kuormituskerrat kyllästetyssä tilassa lisääntyvät /16/.



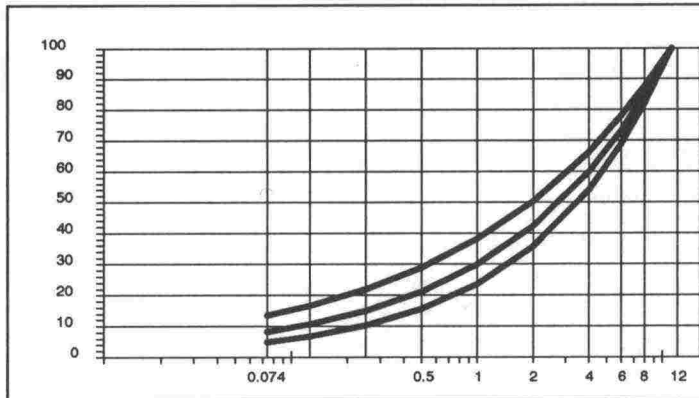
Kuva 12: Kuivan ja osittain kyllästetyn kitkamaanäytteen E-moduuli sivupaineen funktiona /16/

Hienot murskeet ja sorat ovat herkempiä kosteuden vaikutukselle kuin vastaavat karkeat materiaalit (kuva 13) /16/. Materiaalin karkeuden vaikutus näkyy kuvassa suorien erilaisena kulmakertoimena. Simonsen & Hjalmarsson päätyivät samaan tulokseen tutkiessaan pohjaveden vaikutusta kantavaan kerrokseen. Pohjaveden etäisyys oli aluksi 70 cm tien pinnasta, mistä se sitten nostettiin 30 cm:iin. Kummassakin tapauksessa määritettyjen kantavan kerroksen E-moduulien suhteeksi saatiin $(E_{-30} : E_{-70}) = 0,72$, kun materiaalina oli karkeaa soraa ja $(E_{-30} : E_{-70}) = 0,88$, kun kantava kerros oli hienoa mursketta.

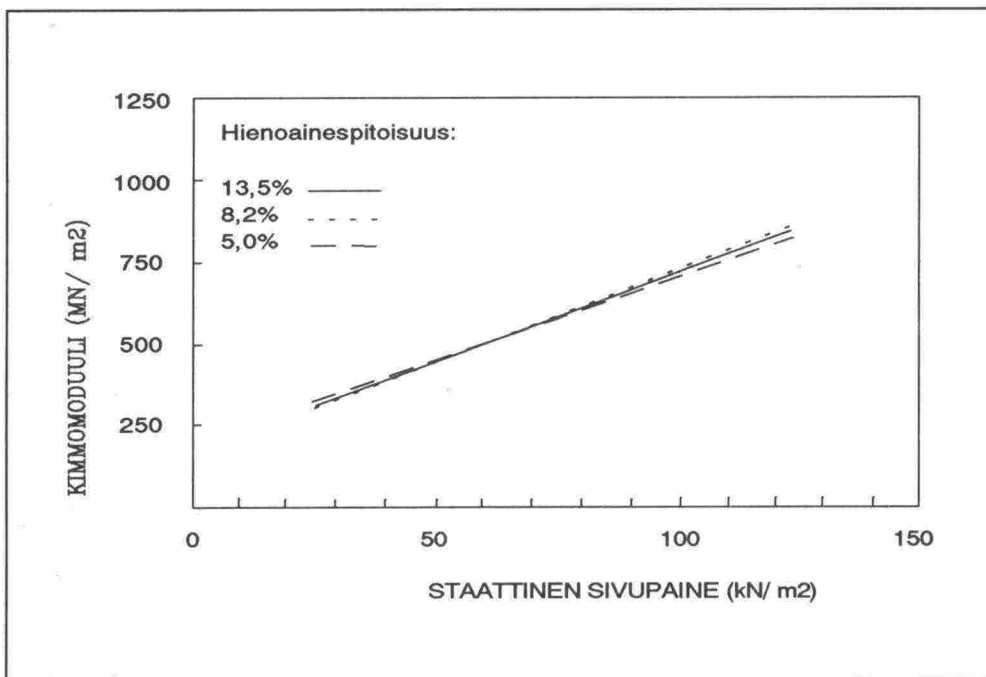


Kuva 13: Vesipitoisuuden vaikutus E-moduuleihin eräillä soramateriaaleilla. E-moduuli on suoraan verrannollinen K:hon. (Tutkittavina oli kaksi soramursketta ja kaksi luonnonsoraa /16/)

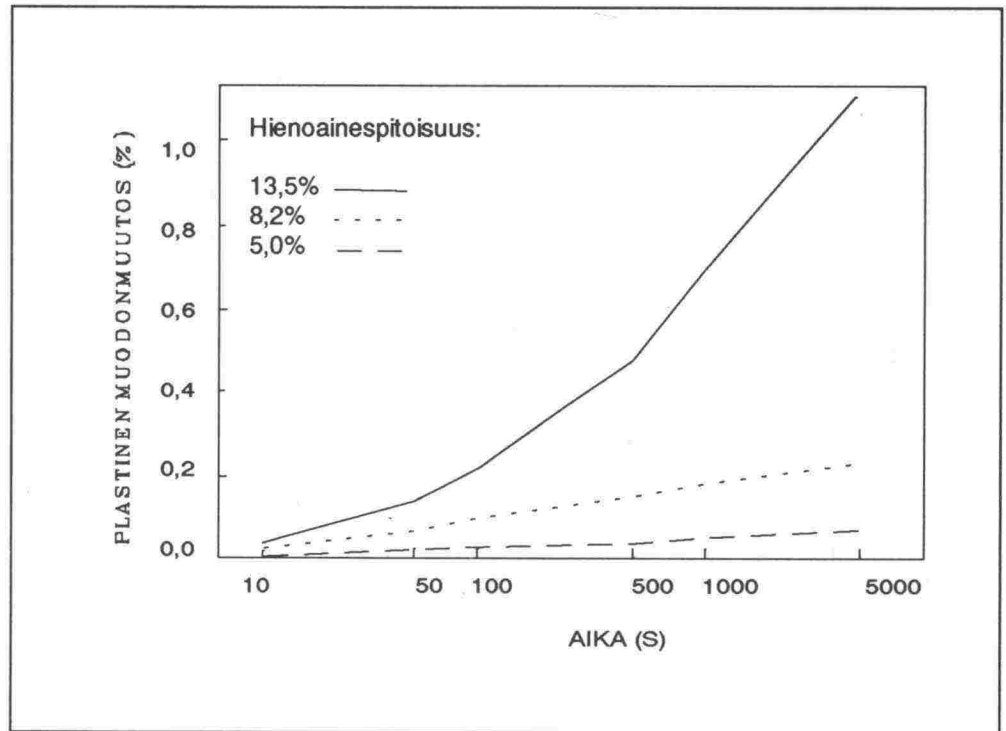
Hienoaineksen määrä, käsitettynä 0,074 mm:n seulan läpäisyprosenttina, ei aina vaikuta E-moduulin arvoon (kuva 15). Vaikka hienoainespitoisuus (raekoko < 0.075 mm) muuttuu 5:stä 13,5%:iin, sillä ei ole merkittävää vaikutusta kimmoiseen muodonmuutokseen, joka riippuu enemmän jännitystilasta. Hienoaineksen laadulla, eli saviaineksen suhteellisella osuudella, saattaa tästä huolimatta olla merkitystä. Pitkäaikaisen kuormituksen aiheuttamaan plastiseen muodonmuutokseen hienoaineksen määrällä on suuri vaikutus (kuva 16). Molemmissa kuvissa on käytetty samoja materiaaleja, joiden maksimiraekoko oli 11,2 mm (kuva 14).



Kuva 14: Kokeissa käytettyjen materiaalien rakeisuudet /18/



Kuva 15: E-moduuli sivupaineen funktiona erilaisilla hienoainespitoisuuksilla /18/.



Kuva 16: Plastinen muodonmuutos ajan funktiona erilaisilla hienoainespitoisuuksilla /18/.

Tielaitoksen suunnitteluohjeen /23/ mukaan maalajin kantavuusominaisuudet riippuvat sen rakeisuudesta, vesipitoisuudesta ja tiivyydestä. Maalajeille on annettu likimääräiset rakeisuusalueet sekä niitä vastaavat E-moduulien arvot. Vesipitoisuuden vaikutuksesta on myös kerrottu maalajeittain. Päälysrakenteen materiaaleille ja alusrakenteille käytettävät E-moduulin arvot on ohjeessa esitetty taulukkomuodossa (taulukot 1 ja 2).

Taulukko 1: Päälysrakenteen E-moduulit /23/

Materiaali	E-moduuli MN/m ²
Asfalttibetoni	2500
Kevytasfalttibetoni	1500
Öljysora	350
Bitumisora	2500
Imeytyssepellys	700
Sementillä lujitettu kitkamaa	2000...2500
Kalkilla lujitettu koheesiomaa (lyhytaikaisesti)	200...400
Routimaton murske (jakavan tai kantavan kerroksen rakeisuusalue)	200...350
Sora ja sorainen hiekka (jakavan kerroksen rakeisuusalue)	150...280
Routimaton hiekka (suodatinkerroksen rakeisuusalue)	30...100
Routiva murske tai sora-moreeni (moreenimurskerakenteen rakeisuusalue, ja rakenne on kuivatettu ohjeen mukaisesti)	
- penkereessä	150
- leikkauksessa	100

Taulukko 2: Alusrakenteen kantavuus /23/

Maalaji	Tarkennus	Lyhennys	Luokka	Kantavuus MN/m ²
Kallio	kallio	Ka	A	A=300
	louhe	Lo	A	
	murske	M	A	
Kivet ¹⁾		Ki	A	B=200 (150...280)
Sora		Sr	B	
Soramoreeni	routimaton	rton SrMr	C	C=100 (70...150)
	routiva ²⁾	SrMr	E (F) ⁴⁾	
Hiekka	routimaton			D=50 (35...70)
	karkea	rton kaHk	C	
	routimaton			
	keskikarkea	rton keHk	D	
	routimaton			
	hieno	rton hHk	D (E) ⁴⁾	
	routiva			
	keskikarkea	keHk	E	
Hiekkamoreeni	routimaton	rton HkMr	D (E) ⁴⁾	E=20 (15...35)
	routiva ²⁾	HkMr	E (F) ⁴⁾	
Siltti		Si	F (G ⁴⁾ , E ⁵⁾	F=10 (5...15)
Silttimoreeni		SiMr	F (G ⁴⁾ , E ⁵⁾	
Savi	kuivakuori (h ≥ 1m)	kuivak.Sa	E	
	sitkeä (Su ≥ 25kN/m ²) ³⁾	Sa	F (E) ⁵⁾	
	pehmeä (Su < 25kN/m ²) ³⁾	Sa	G	G=5
Lieju		Lj	G	
Turve		Tv	G	

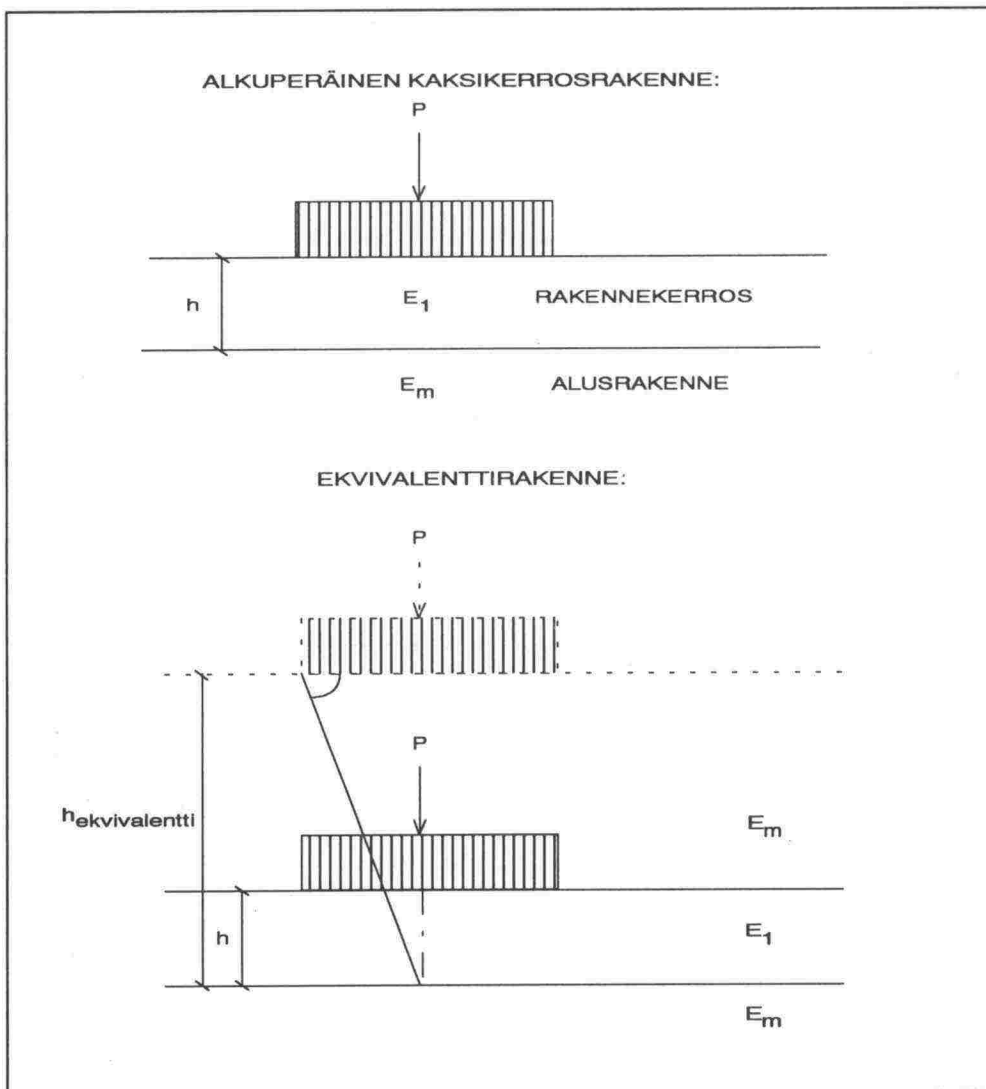
Alusrakenteen kantavuus arvioidaan normaalisti pohjamaan maalajin perusteella. Jos pengerträtteen paksuus on vähintään 1 m, käytetään pengertäytteen kantavuusluokkaa. Jos pengerträtteen paksuus on alle 1 m, alusrakenteen kantavuus voidaan laskea kantavuuskaavalla, kun E-moduuliksi valitaan pengertäytteen kantavuusluokkaa vastaava kantavuus. Myös muut alusrakenteen pinnassa olevat varsinaista pohjamaata paremmin kantavat maakerrokset rinnastetaan tässä suhteessa pengertäytteeseen.

Huomautukset:

- 1.) Routiva murske sekä routivaa maata sisältävä louhe ja kivet rinnastetaan vastaavaan routivaan maalajiin
- 2.) Kantavuudeksi voidaan valita 35 MN/m², jos kysymyksessä on kuiva penger tai jos hienoainespitoisuus on enintään 20% ja paikka ei ole märkä (katso huomautus 4)
- 3.) Siipikairauksella todettu suljettu leikkauslujuus
- 4.) Suluissa olevaa kantavuusluokkaa käytetään, kun maa-aines on märkää lopullisessa alusrakenteessa eli pohjaveden etäisyys alusrakenteen pinnasta on alle 1 m tai, paikkaan keraantyy pintavesiä.
- 5.) Penkereessä kuivana

2.4.2. Laskennallisen kantavuuden määrittäminen

Kimmoteoreettinen tarkka ratkaisu jännityksille ja muodonmuutoksille maassa on johdettu homogeenisen puoliavaruuden tapauksessa (Boussinesq vuonna 1885). Kaavoilla voidaan laskea pistekuorman aiheuttamat jännitykset ja muodonmuutokset mielivaltaisessa pisteessä kuormituksen alla. Näistä integroimalla saadaan lasketuksi jakautuneen pintakuorman vaikutus. Myöhemmin johdetut kaavat (mm. Burmister vuonna 1949 kaksikerrosrakenteelle) olivat hyvin monimutkaisia, eikä niitä voitu käyttää muuten kuin nomogrammimuodossa. Käytännön tarpeisiin kehitettiin likiarvomenetelmä, jolla voitiin helposti tulkita levykuormituskokeiden tuloksia (Odemark 1949) /24/. Odemarkin menetelmään liittyy alunperin neuvostoliittolaisten tutkijoiden esittämä ajatus ekvivalenttirakenteesta (kuva 17).



Kuva 17: Kaksikerrosrakenteen muuttaminen homogeeniseksi ekvivalenttirakenteeksi pohjamaan painuman laskemista varten.

Odemarkin menetelmä tässä tapauksessa toimii seuraavasti:

1. Lasketaan painuma rakenteen (ylemmän kerroksen) pinnassa. (materiaali E_1)
2. Lasketaan painuma ylemmän kerroksen alapinnassa. (materiaali E_1)
3. Vähennetään kohdasta 1 kohta 2 ja saadaan ylemmän kerroksen kokoonpuristuma. (materiaali E_1)
4. Korvataan ylempi kerros alemman kerroksen materiaalilla niin, että korvaavalla kerroksella on sama taivutusjäykkyys kuin alkuperäisellä kerroksella. (ekvivalenttipaksuus, materiaali E_m)
5. Lasketaan painuma pohjamaassa. (materiaali E_m)
6. Summataan kohdat 3 ja 5 ja saadaan koko rakenteen painuma.

Koska jäykemmässä kerroksessa pystyjännitys pienenee nopeammin kuin homogeenisessa pohjamaassa (kuormituksen jakautuminen), pitää ylemmän kerroksen paksuutta pienentää korjauskertoimilla, jotka kasvattavat alemman kerroksen painumia kohdissa 2 ja 5. Näiden kertoimien arvoksi tuli tarkkaan ratkaisuun (Burmister) verratessa 0,9.

Kaksikerrosrakenteen ekvivalenttipaksuuden kaava saadaan kohdan 4 perusteella, kun merkitään taivutusjäykkyydet yhtäsuuriksi /25, 10/:

$$h_e = n \cdot h_1 \cdot \sqrt[3]{(E_1/E_m)} \quad (15)$$

missä h_e on ylemmän kerroksen ekvivalenttipaksuus suhteessa alempaan kerrokseen, (m)
 n on korjauskerroin
 h_1 on ylemmän kerroksen paksuus, (m)
 E_1 ja E_m ovat kerrosten E-moduulit, (MN/m²)

Korjauskertoimen n arvoon vaikuttavat kerrospaksuudet, E-moduulien suhteet, Poissonin luku ja kerrosten lukumäärä. Korjauskertoimelle käytetään yleensä arvoa 0.9 kaksikerrossysteemissä ja arvoa 0.8 useampikerroksisessa rakenteessa. /12, 25/

Kaksikerrosrakenteen painuma s_0 tien pinnassa saadaan kaavasta /24/:

$$s_0 = t + s_{h,m} \quad (16)$$

eli kerroksen kokoonpuristuman t ja ekvivalenttirakenteena lasketun pohjamaan painuman s summana. Kun Poissonin lukuna käytetään arvoa 0,5, saadaan painuman laskentakaava seuraavaan muotoon:

$$s_0 = \frac{1,5 \cdot \sigma_0 \cdot a}{E_m} \left[1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \left(0,9 \frac{h_1}{a}\right)^2}} \frac{E_m}{E_1} + \frac{1}{\sqrt{1 + \left(0,9 \frac{h_1}{a} \sqrt{\frac{E_1}{E_m}}\right)^2}} \right] \quad (17)$$

Tässä s_0 on rakenteen kokonaispainuma
 σ_0 on rakenteen pinnalla vaikuttava jännitys (=pystysuora paine)
 a on kuormitussäde (=kuormituslevyn säde)
 E_m on alemman kerroksen E-moduuli
 E_1 on ylemmän kerroksen E-moduuli
 h_1 on ylemmän kerroksen paksuus

Yllä oleva kaava on sama kuin Tielaitoksen suunnitteluohjeissa /23/ oleva mitoituskaava, kun siihen sijoitetaan levykuormituskokeen arvot ja kaavasta ratkaistaan E_1 .

Monikerrosrakenteen taipuma tien pinnassa kuormituslevyn keskellä saadaan johdettua kuten kaksikerrosrakenteelle. Kaavoja on kehitellyt tanskalainen Kirk v. 1961 (kyseessä on Odemarkin tapaan likiarvokaava). Yhtälön yleinen muoto on /26/:

$$s_0 = t_1 + t_2 + \dots + t_{(m-1)} + s_{h,m} \quad (18)$$

missä s_0 on monikerroksisen rakenteen (materiaaleilla eri E-moduulit) taipuma tien pinnassa kuormituslevyn keskellä
 $t_1 \dots t_{(m-1)}$ ovat alusrakenteen yläpuolella olevien kerrosten 1... (m-1) kokoonpuristumat
 $s_{h,m}$ on pohjamaan painuma syvyydellä h

Poissonin luvulla 0.5 ja korjauskertoimen n arvolla 0.8 saadaan /26/:

$$s_0 = \frac{1,5 \cdot \sigma_0 \cdot a}{E_m} \left[\left[1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \left(0,8 \frac{h_1}{a}\right)^2}} \right] \frac{E_m}{E_1} + \left[\frac{1}{\sqrt{1 + \left(0,8 \frac{h_1}{a} \sqrt{\frac{E_1}{E_2}}\right)^2}} - \frac{1}{\sqrt{1 + \left(0,8 \frac{h_1}{a} \sqrt{\frac{E_1}{E_2}} + 0,8 \frac{h_2}{a}\right)^2}} \right] \frac{E_m}{E_2} + \left[\frac{1}{\sqrt{1 + \left(0,8 \frac{h_1}{a} \sqrt{\frac{E_1}{E_3}} + 0,8 \frac{h_2}{a} \sqrt{\frac{E_2}{E_3}}\right)^2}} - \frac{1}{\sqrt{1 + \left(0,8 \frac{h_1}{a} \sqrt{\frac{E_1}{E_3}} + 0,8 \frac{h_2}{a} \sqrt{\frac{E_2}{E_3}} + 0,8 \frac{h_3}{a}\right)^2}} \right] \frac{E_m}{E_3} + \dots \right]$$

... +

$$\sqrt[1]{1 + \left[0.8 \frac{h_1}{a} \sqrt[3]{\frac{E_1}{E_m}} + 0.8 \frac{h_2}{a} \sqrt[3]{\frac{E_2}{E_m}} + 0.8 \frac{h_3}{a} \sqrt[3]{\frac{E_3}{E_m}} + \dots + 0.8 \frac{h_{m-1}}{a} \sqrt[3]{\frac{E_{m-1}}{E_m}} \right]^2} \quad (19)$$

Kerrosten kokoonpuristumiin vaikuttavat myös päällä olevien kerrosten E-moduulit (kaava 19). Tämä riippuvuus on ilmeinen, koska kuormitus vaikuttaa rakenteen pinnalla ja syvyyden kasvaessa pieneneviä jännityksiä vastaavat pienemmät kokoonpuristumat. Tielaitoksen mitoituskavaa voidaan käyttää periaatteessa ainoastaan silloin, kun lasketaan pohjamaan päälle tulevan yhden lisäkerroksen vaikutusta kantavuuteen. Jos sen sijaan lisättäviä kerroksia on enemmän kuin yksi, tulisi käyttää monikerroskaavaa tai siihen perustuvia tietokoneohjelmia.

Kaksikerroskaavan toistaminen sellaisenaan johtaa monikerrosrakenteita laskettaessa usein kantavuuden yliarviointiin, varsinkin heikoilla alusrakenteilla. Alusrakenne, jossa jännitykset vaikuttavat äärettömyyteen asti, oletetaan kaksikerroskaavaa käytettäessä yhä jäykemmäksi, mikä johtaa liian pieneen painumaan ja siksi liian suureen kantavuuteen. Kun ajatellaan, miten kaksikerroskaavalla laskeminen etenee, huomataan, että alhaalta päin laskettaessa käytetään kunkin kerroksen pinnassa aina samansuuruisia kuormitusta. Tämä ei voi olla oikein, sillä todellisessa tilanteessa kuorma sijaitsee rakenteen pinnalla.

Tarkkaa analyyttistä ratkaisua ei kimmoteorian perusteella ole kyetty johtamaan. Sellaisen löytäminenäkään ei vielä auttaisi selittämään tierakenteen jännitys- ja muodonmuutoskäyttäytymistä täydellisesti, sillä materiaalit eivät käyttäydy puhtaasti lineaarisen kimmoteorian mukaan. Tiessä vaikuttavat jännitykset ovat kuitenkin kelvollisessa rakenteessa yleensä sillä alueella, missä muodonmuutokset ovat palautuvia ja lineaarisia, joten kimmoteoriaan tyytyminen yksinkertaistavine oletuksineen on perusteltua.

3. KOEALUEET JA TUTKIMUSAINEISTO

3.1. Yleistä

Kuten edellä todettiin, kuormitusmitoitusmenetelmä perustuu tien heikoimpaan eli ns. kevätkantavuuteen. Jos kantavuudet on mitattu muulloin kuin heikoimpana aikana, ne tulee korjata vastaamaan tien heikointa kantavuutta.

Tutkimusta varten valittiin eri osista Suomea koealueita, joissa päällystetyyppi, rakentamistapa, alusrakenteen laatu ja kuivatusolosuhteet vaihtelivat. Sää- ja ilmastotietoina käytetään koealueita lähellä sijaitsevien Ilmatieteen laitoksen säähavaintoasemien mittauksia.

Koealueiden kantavuudet määritettiin useita kertoja kevään, kesän ja syksyn aikana, jotta saataisiin selville tierakenteiden kantavuusvaihtelu ja voitaisiin määrittää kevätkantavuuskertoimet. "Kevätkantavuutena" käytetään vuosien 1987 ja 1988 kolmanneksi pienintä mitattua kantavuutta. Kantavuusmittaukset tehtiin levykuormituslaitteella, Benkelman-palkilla sekä pudotuspainolaitteella.

Koealueilta otettujen materiaalinäytteiden perusteella määritettyjä rakennekerrosten E-moduuleita verrataan pudotuspainolaitteella mitattujen taipumasuppilon avulla määritettyihin E-moduuleihin. Lisäksi selvitetään Odemarkin kaksikerroskaavalla määritettyjen laskennallisten kantavuuksien käyttökelpoisuutta.

3.2. Koealueet

Alkujaan tarkastelussa oli mukana koealueita Turun, Kymen, Mikkelin, Pohjois-Karjalan, Keski-Suomen, Vaasan, Keski-Pohjanmaan, Oulun ja Lapin tiepiireissä. Osalla koealueita tiedot ovat puutteellisia, mistä syystä ne jätettiin pois. Varsinaisessa tarkastelussa on mukana 22 tietä. Mittauspisteitä on yhteensä 253 (taulukko 3).

Taulukko 3: Valitut koealueet

TIEPIIRI	TIE	PISTEITÄ	TIETYYPPI	POHJAMAAT
Turku	Pt 12895	10	ÖS, krp	Sa, Si
Kymi	Mt 377	18	SR, rak	Hk, Si, Sa
	Mt 369	6	AB, krp&rak	Hk, Si
Keski-Suomi	Pt 16691	12	SR, rtn	Si, HkMr, Hk
	Pt 16687	12	ÖS, krp	HkMr
Mikkeli	Pt 15142	12	SR, rtn	HkMr, Tv
	Mt 4321	18	SR, rtn	HkMr
	Mt 4201	21	ÖS, rrp	HkMr, Sa, Tv
Vaasa	Vt 16	3	AB, rrp	Sa
	Mt 7033	15	ÖS, krp	Si, SiMr
	Pt 17631	15	SR, rtn	Si, SiMr
Keski-Pohjanmaa	Pt 18183	12	ÖS, krp	Sa, HkMr
	Mt 772	15	ÖS, rak	Si, HkMr, Tv
	Pt 18148	12	SR, rak	Si, HkMr
	Pt 18151	3	SR, rak	Tv
	Pt 18149	15	SR, rtn	Si, HkMr
	Pt 18259	3	ÖS, krp	Tv
	Kt 86	6	ÖS, rak	Si, HkMr
Oulu	Mt 8152	10	ÖS, rak	Sa
	Mt 815	5	AB, rak	Hk, HkMr
	Pt 18669	10	SR, rak&rtn	HkMr, Tv, Hk
	Pt 18672	20	SR, rtn	HkMr, Hk, Tv

Taulukon sarakkeessa *tietyyppi* on päällysteen lisäksi ilmoitettu onko tie rakennettu (rak), parannettu (krp) vai rakentamaton (rtn).

3.3. Tutkimusaineisto

3.3.1. Tehdyt mittaukset ja määritykset

Koealueilla mitattiin kantavuuksia vuosina 1987 ja -88 noin 12 kertaa vuodessa. Mittaukset on tehty pääosin Benkelman-palkilla. Kymen tiepiirin pisteet vuonna 1988 sekä Vaasan ja Turun tiepiirien pisteet molempina vuosina on mitattu piirien omilla Kuab-pudotuspainolaitteilla. Oulun yliopisto on tehnyt pudotuspainolaitemittaukset (Phønix) yhtä aikaa Oulun tiepiirin Benkelman-mittausten kanssa. Keski-Pohjanmaan tiepiirin soratiet on mitattu levykuormituslaitteella.

Koealueiden tierakenne on määritetty autokairausten avulla. Päällys- ja alusrakennekerroksista on tehty rakeisuusanalyysit sekä määritetty kerrospaksuudet. Oulun tiepiiri on tehnyt Troxler-laitteella tiheys- ja kosteusmittauksia sekä pohjavesiputkien avulla pohjavesihavaintoja omilla koealueillaan. Keski-Suomen kohteista

on mitattu Troxler-kosteus kerran vuonna 1988. Muissa tiepiireissä ei ole tehty vastaavia mittauksia.

Sää tiedot on saatu mittauskohteita lähellä olevilta säähavaintoasemilta: Oulun lentoasema, Ylistaro, Nivala, Lappeenranta, Mikkeli, Jyväskylä ja Kokemäki (Peipohja). Tietoina on käytetty viiden vuorokauden sademääriä ja keskilämpötiloja vuosilta 1986, -87 ja -88 /27/. Koska pohjaveden korkeutta ei ole yleisesti mitattu, pohjaveden asemaa kuvaamaan on käytetty Hyrynsalmen, Pieksämäen, Padasjoen ja Mynämäen mittausasemien pohjavesihavaintoja /28/. Osa pohjaveden mittausasemista sijaitsee varsin kaukana koealueista, mistä syystä pohjavesihavainnot ovat käytännössä ainoastaan suuntaa antavia.

3.3.2. Tutkimusaineiston käsittely

Koealueiden kevät kantavuus

Kevät kantavuuden suuruutta ja heikoimman kantavuuden ajankohtaa pyrittiin selittämään edellisen talven pakkasmäärällä, edellisen talven pakkaskauden pituudella, tehokkaalla pakkassummalla, maan lämpövarastolla, pakkastaseella, edeltävien eri pituisten jaksojen sademäärillä ja edellisen vuoden pohjaveden korkeudella.

Tässä tehokkaalla pakkassummalla tarkoitetaan edeltävän talven pakkasmäärää siitä lähtien, kun lämpötila alittaa -5°C , mikä likimain vastaa roudan muodostumisaikaa /29/. Lämpövarastolla tarkoitetaan sulan kauden lämpösummaa, joka on kertynyt edellisenä vuonna. Rajana keväällä on käytetty $+5^{\circ}\text{C}$:n pysyvää ylittymistä, jolloin roudan on oletettu jo sulaneen. Pakkastaseella kuvataan pakkasmäärää oletetusta roudan muodostumisesta (-5°C) mittaushetkeen. Pakkastase vaihtelee mittausajankohdittain muiden muuttujien ollessa aina tiepiireittäin vakioita samana mittausvuonna. Lämpötilat otettiin tarkasteluihin viiden vuorokauden keskiarvoina. Pohjavesi on käsitelty hydrologian laitoksen mittausten osalta poikkeamana pitkäaikaisesta keskiarvosta.

Sateet laskettiin samoin viiden vuorokauden keskiarvoina. Lisäksi tarkistettiin Oulun koealueiden osalta edeltävien sateiden vaikutus yhden vuorokauden tarkkuudella. Sademäärätarkastelun pisin jakso 90 vrk ennen heikointa kantavuutta kuvasi samalla myös edellisen talven lumitilannetta. Oulun, Vaasan ja Turun pisteillä tutkittiin edeltävän sademäärän vaikutusta erikseen pienimmän mitatun kantavuuden aikana ja silloin, kun alusrakenne oli heikoimmillaan.

Turun, Kymen, Mikkelin, Keski-Suomen, Vaasan ja Oulun piireistä valittiin heinäkuun aikana tehdyistä mittauksista ne, jotka sijoituivat pisteittäin samalle viikolle eri vuosina (-87, -88). Näin pyrittiin saamaan kantavuuden muutos

riippumattomaksi liikenteen aiheuttamasta tiivistymisestä ja siten selville sateen vaikutus kevätkantavuuden jälkeiseen kantavuuteen.

Roudan muodostumisnopeuden vaikutusta kevätkantavuuteen tutkittiin laskemalla pakkasumma pysyvästä alle -5°C :sta 5, 10, 15, 20, 25 ja 30 vrk eteenpäin (vertaa kuvaan 6).

Koealueiden taipumasuppilot ja määritetyt kerrosten E-moduulit

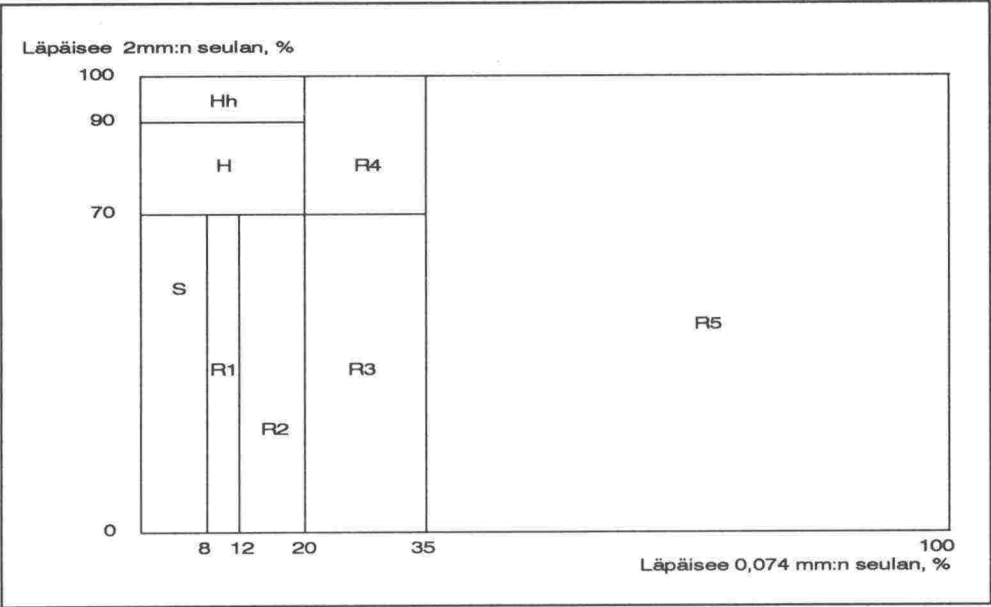
Tiedot taipumasuppiloista saatiin Turun ja Vaasan tiepiireistä. Vuoden 1987 tulokset oli kirjattu pintamoduuleina ja vuoden -88 tulokset taipumina. Oulun yliopistolla oli tiedot omista mittauksista. Pintamoduulit muutettiin laskentaa varten taipumiksi soveltamalla kaavaa 20 (sivulla 58) ja taipumat korjattiin 50 kN:n kuormitusta vastaaviksi lineaarisesti interpoloimalla.

Taipumasuppiloiden perusteella laskettiin kaikille koepisteille kantavuus ja lisäksi ylemmän ja alemman kerroksen E-moduulit jokaisesta mittauksesta erikseen. Kaikki rakenteet jaettiin siten, että ylemmän kerroksen paksuus oli 40 cm, mikä vastaa tutkituilla koealueilla yleensä päällysteen ja kantavan kerroksen yhteistä paksuutta. Laskenta tehtiin Phønixin ohjelmalla, joka suoraan sopii Oulun yliopiston pudotuspainolaitteella mitattujen taipumien tulkintaan. Koska Phønixin pudotuspainolaitteessa geofonien etäisyyksinä käytetään 0, 21, 33, 51, 81 ja 127 cm, täytyi Kuab-mittausten vastaavat etäisyydet 0, 20, 45 ja 90 cm muuntaa ohjelmaan sopiviksi. Muunnos tehtiin kahdessa osassa. Kolmen ensimmäisen Phønix-geofonin etäisyyksiä vastaavat taipumat saatiin interpoloimalla kolmannen asteen polynomista, joka kulkee kaikkien neljän Kuab-taipuman kautta. Kolme viimeistä Phønix-taipumaa laskettiin eksponenttikäyrältä, jonka perusteena on kolme viimeistä Kuab-taipumaa.

Laskennalliset ja mitatut kantavuudet

Mitattujen ja laskettujen kevätkantavuuksien vertailua sekä alusrakenteen kantavuuden iterointia varten aineistosta valittiin satayksitoista koepistettä. Pisteet jakaantuivat seuraavasti: Turun piiristä on 6 pistettä, Kymen 4, Mikkelin 9, Keski-Suomen 7, Vaasan 25, Keski-Pohjanmaan 21 ja Oulun 39 pistettä. Näistä AB-pisteitä oli 11, KAB-pisteitä 2, ÖS-pisteitä 42 ja SR-pisteitä 56. Joukkoon kuului kaikilla kolmella laitteella mitattuja koealueita.

Mitattuna kantavuutena käytettiin kevätkantavuutta (määritelmä sivulla 40). Pisteistä tiedettiin rakennekerrosten paksuudet ja materiaalien rakeisuudesta läpäisyprosentit kahdelta seuralta: 0.074 ja 2 mm. Läpäisyarvojen perusteella määritettiin sitomattomille rakennekerroksille kahdeksan kantavuusluokkaa (kuva 18).



Kuva 18: Maalajeille käytetty luokittelu kahden läpäisyarvon perusteella.

Rakenneluokille kokeiltiin kolmea vaihtoehtoista E-moduulien ryhmää, jotka edustivat eri kosteustilanteita (taulukko 4). VE1 on huonoin tilanne (märkä), VE2 keskimääräinen ja VE3 kuvaa E-moduuleja hyvissä olosuhteissa (kuiva).

Taulukko 4: Rakenneluokille annetut E-moduulien arvot (MN/m²)

	VE1	VE2	VE3
AB	2500	2500	2500
KAB	1500	1500	1500
ÖS	350	350	350
saso	100	100	100
s	200	200	280
h	50	50	70
hh	50	50	50
r1	70	150	200
r2	20	20	70
r3	20	20	30
r4	20	20	30
r5	20	20	20

Alusrakenteen kantavuutta iteroitiin Tielaitoksen käyttämään mitoituskaavaan perustuvalla ohjelmalla (liite 1). Ohjelma toimii kasvattamalla alusrakenteen E-moduulia, kunnes saavutetaan mitattu kantavuus rakenteen päältä. Iterointi päättyy, kun seuraava laskettu alusrakenteen kantavuus on riittävän lähellä edellistä arvoa. Tähän lisättiin vielä toinen lopetusehto alustan kantavuuden ylärajan muodossa

(< 1000 MN/m²). Ylisuuri E-moduuli tarkoittaa, että ylemmät kerrokset on arvioitu liian heikoiksi, eikä iteraatio anna alusrakenteen kantavuudelle järkevää tulosta.

Laskennalliset kantavuudet määritettiin Tielaitoksen ohjelmalla, joka sellaisenaan vastaa suunnitteluohjeen mitoituskaavaa ja siihen liitettyjä rajoituksia (liite 2). Alusrakenteiden kantavuuksina käytettiin voimassa olevan suunnitteluohjeen mukaisia kantavuuksia (taulukko 5).

Taulukko 5: Alusrakenteille annetut E-moduulien arvot

Alusrakenne	Kantavuus, MN/m ²
Hk	50
Sa	10
kSa	20
kSi	10
mSi	5
kHkMr	20
mHkMr	10
Tv	5

4. TUTKIMUSTULOKSET

4.1. Koealueiden kantavuus- ja sääolosuhteiden vaihtelu eri vuosina

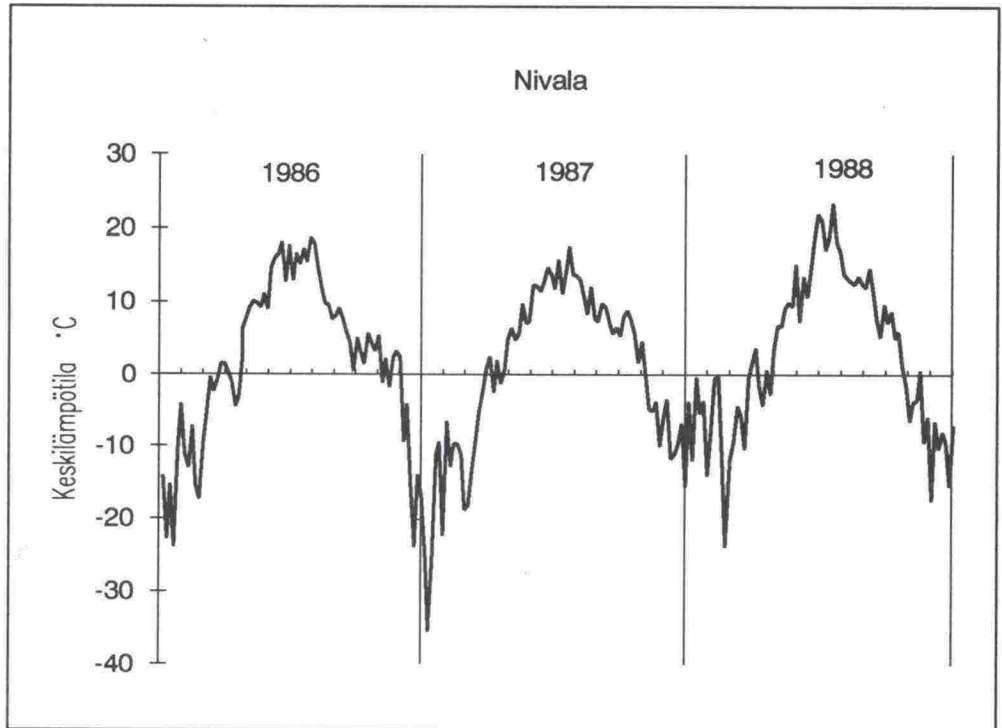
Kaikki mittaukset sijoittuivat huhtikuun ja lokakuun väliseen aikaan. Kantavuuden pienimuotoinen vaihtelu oli pisteittäin eriaikaista ja erisuuntaista. Kantavuuksien yleiskehitys oli odotetun kaltaista keväällä, mutta kesällä ja syksyllä kantavuus muuttui eri tavalla eri pisteissä. Kevätkantavuus saavutettiin yleensä aikaisemmin vuonna 1988 kuin vuonna 1987. Pienin kevätkantavuusarvo voitiin saavuttaa koealueesta riippuen kumpana vuonna tahansa.

Suuret sateet ja lämpötilan muutokset sattuivat suunnilleen samaan aikaan eri koealueilla. Ilmastoerot näkyvät vain pieninä eroina sademäärissä ja lämpötiloissa. Kuva 19 esittää lämpötilan kehitystä ja kuva 20 sademääriä vuonna 1986 - 1988.

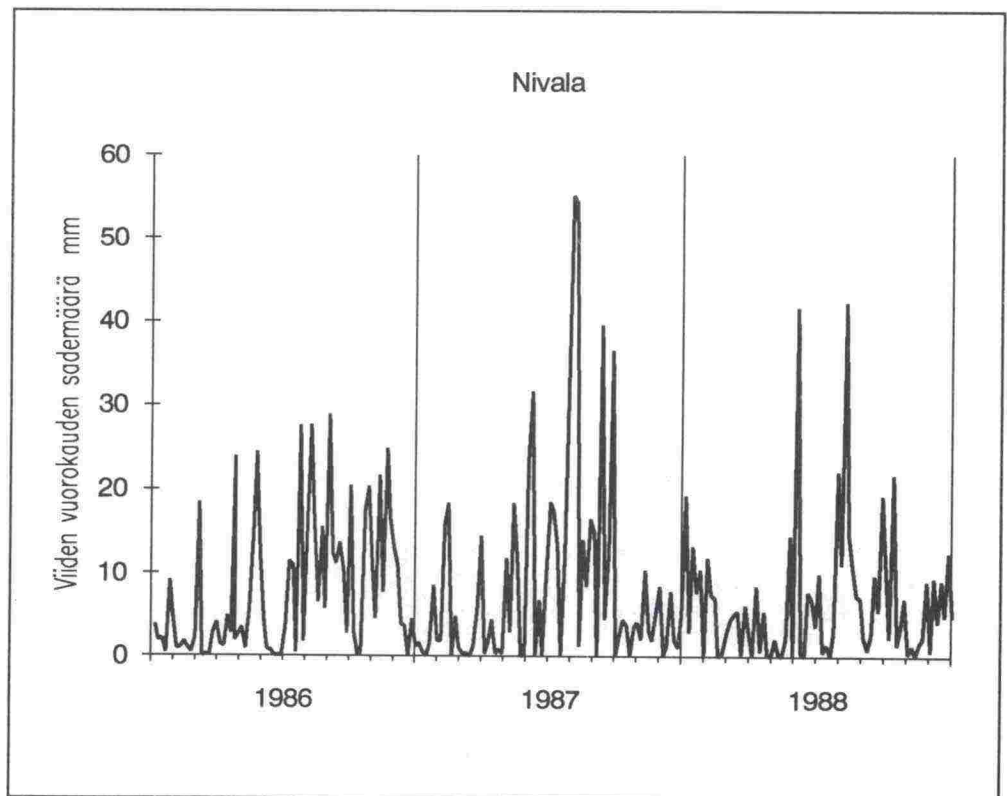
Koesarjaa edeltävänä talvena 1985 - 86 oli lunta ja vettä normaalisti. Kevät tuli aikaisin, kesä oli lämmin ja kuiva, mutta syksy erittäin sateinen ja alkupuoleltaan kylmä. Marras- joulukuussa vettä oli poikkeuksellisen paljon ja talvi 1986 - 87 tuli myöhään.

Vuonna 1987 tammikuussa lumipeite oli ohut ja oli ennätyksellisen kylmää, joten routa tunkeutui tavallista syvemmälle. Kesä oli hyvin kylmä ja märkä. Loka- ja marraskuu olivat vähäsateisia. Lumipeite kasvoi Lappia lukuunottamatta tavanomaista paksummaksi.

Vuosi 1988 alkoi runsaslumisena ja keväällä satoi paljon. Kesä- ja heinäkuu olivat poikkeuksellisen lämpimiä. Syksy oli tavanomainen, mutta talvi tuli aikaisin /28/.



Kuva 19: Viiden vuorokauden keskilämpötilan kehitys Keski-Pohjanmaalla vuosina 1986 - 1988



Kuva 20: Viiden vuorokauden sademäärät Keski-Pohjanmaalla vuosina 1986 - 1988

4.2. Koealueiden kevätkantavuus

4.2.1. Kevätkantavuus ja kevätkantavuuskerroin

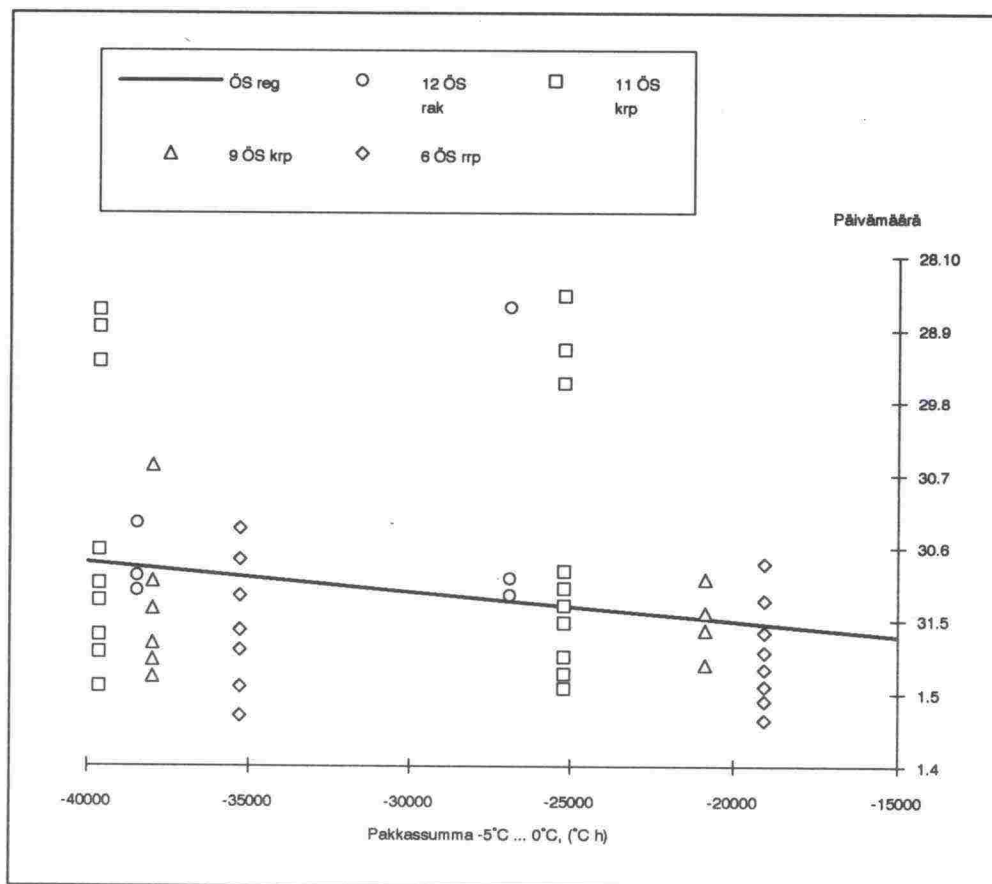
Koealueiden edustavaksi kevätkantavuudeksi on valittu kahden mittausvuoden kolmanneksi pienin kantavuus. Valinnan perusteena on, että kaksi heikointa kantavuutta esiintyy yleensä niin lyhyen aikaa, ettei sillä ole merkittävää vaikutusta tierakenteen vaurioitumiseen. Lisäksi mittaustuloksissa saattaa olla virheitä. Tällöin pienimmän arvon käyttö voi johtaa virheelliseen lopputulokseen.

Kantavuuden mittaminen heikoimpana aikana ei aina ole mahdollista. Muulloin mitatut kantavuudet tulee muuttaa kevätarvoiksi korjauskertoimella. Korjauskerroin, jota kutsutaan kevätkantavuuskertoimeksi, on kevätkantavuuden suhde muulloin mitattuun kantavuuteen.

4.2.2. Kevätkantavuuteen vaikuttavat tekijät

Heikoimman kantavuuden ajankohta

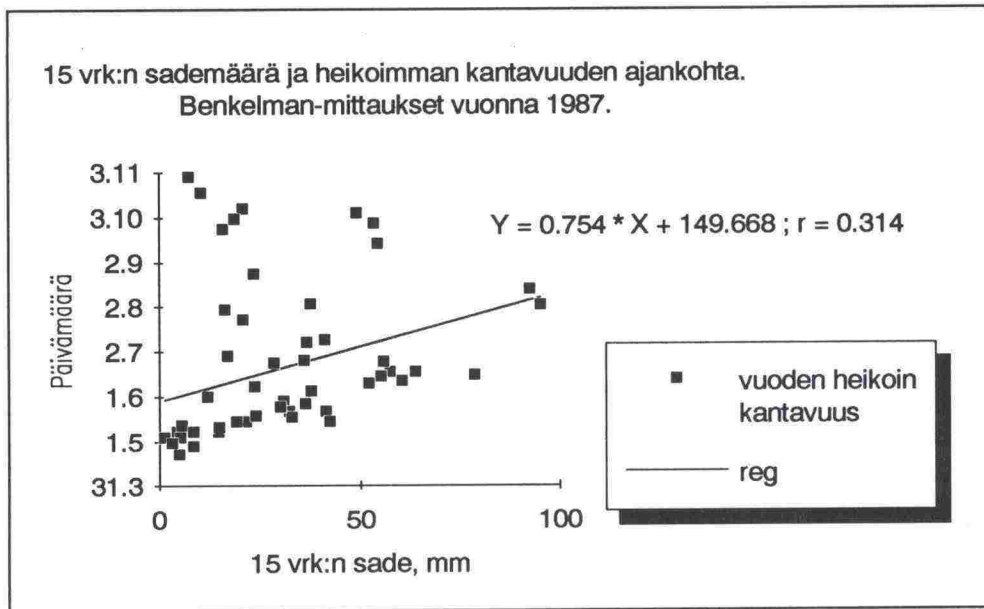
Edeltävän talven pakkasmäärä selittää jonkin verran heikoimman mitatun kantavuuden ajankohtaa paikallisesti, eli kunkin tiepiirin alueella erikseen. Päälystelajeittain verrattaessa, eli koko maan tiedot yhdistettäessä, riippuvuutta ei enää voida havaita. Tehokas pakkassumma eli routaa muodostavan pakkasen lisäys myöhensi hieman kevätkantavuuden ajankohtaa (kuva 21).



Kuva 21: Heikoimman kantavuuden ajankohta öljysorasteilla tehokkaan pakkassumman funktiona. Koealueen tiedoista ensimmäisenä on tiepiirin numero, sitten päällystetyyppi ja rakennustapa.

SR- ja ÖS-teillä nopea routaantuminen myöhensi heikointa kantavuutta, mutta AB-teillä vaikutus oli päinvastainen. Kevätkantavuuden ajankohtaan pakkaskauden pitenemisellä oli vain lievä myöhentävä vaikutus.

Edellisen vuoden lämpövarasto sopi eri tietyypeistä parhaiten AB-teiden kevätkantavuuden ajan selittäjäksi. Kevätkantavuuden aika on myös selvästi pakkastaseesta riippuva, mikä johtuu siitä, että ajan kuluessa keväällä myös lämpö määrä kasvaa. Kevätkantavuuden aika myöhentyi runsaiden vesisateiden takia (kuva 22). Asfaltiteillä vain pitkäaikaisella sadekertymällä oli vaikutusta kevät-kantavuuden ajankohtaan.



Kuva 22: Heikoimman kantavuuden ajankohta mittausta edeltävän 15 vrk:n sademäärän funktiona. Mittaukset on tehty Benkelman-palkilla useassa tiepiirissä ja erilaisilla teillä.

Edelleen havaittiin, että sateisuus myöhensi myös pohjamaan heikointa aikaa, mutta vähemmän merkittävästi kuin kevätkantavuutta. Kevätkantavuuden ajankohtaa korkea pohjavesi myöhensi melko selvästi.

Heikoimman kantavuuden suuruus

Edellisen talven pakkasmäärä ei selittänyt heikoimman mitatun kantavuuden suuruutta. Sen vaikutus vaihteli suunnaltaan ja määrältään - sekä alueittain että päällystetyypeittäin tarkasteltaessa. Edellisen talven pakkaskauden piteneminen näytti joissakin tapauksissa pienentävän kevätkantavuuskerrointa, eniten tämä vaikutus näkyi päällystetyillä teillä. Suunnaltaan päinvastainen vaikutus pakkaskauden pitenemisellä oli Vaasan tiepiirin koealueilla, mikä viittaa siihen, että pakkaskauden pituus ei ole sinänsä merkittävä tekijä. Jäätymisen nopeuteen ja sitä kautta roudan laatuun vaikuttaa se, miten kylmää maa on ennen pakkasten tuloa. Varsinkin AB-teillä edellisen vuoden lämpötilalla oli vaikutusta heikoimman kantavuuden suuruuteen. Tutkituista suureista edellisen vuoden lämpövarasto selitti jonkin verran AB-teiden kevätkantavuutta, mutta ei vaikuttanut merkittävästi muilla teillä. Tehokas pakkassumma eli routaa muodostavan pakkasen lisäys heikensi hieman kevätkantavuutta. Pakkastaseen vaikutus oli samanlainen kuin pakkasmäärän; mitä kylmempi sää, sitä heikompi kevätkantavuus. Roudan muodostumisnopeudella oli selvimmin vaikutusta AB-teiden kevätkantavuuteen. Nopea tierakenteen jäätymisen johti siihen, että kantavuuden kevättheikkeneminen oli vähäisempää kuin hitaasti kylmenevän talven jälkeen. Tässä 15 vrk:n

tarkastelujakso jäätymisen alusta lukien antoi parhaan riippuvuuden pakkasmäärän ja heikoimman kantavuuden välille.

Kevätkantavuuskertoimen suuruus AB-teillä kasvoi edeltävän sateen määrän lisääntyessä. Toisaalta lumipeitteen kasvu pienensi kerrointa. ÖS- ja SR-teillä sateilla ei ollut havaittavia vaikutuksia kertoimen suuruuteen. Pohjamaan kantavuutta kuvasi parhaiten edeltävä sademäärä, joka oli kertynyt neljä viikkoa ennen mittausta. Heikointa kantavuutta selitti paremmin kahden viikon sademäärä. Sorateillä sateet eivät vaikuttaneet merkittävästi kantavuuden minimiarvoihin.

Tutkituista alueista Turku tuntui sopivan parhaiten pohjavesihavaintojen ja kantavuusmittausten yhdistämiseen, koska siellä eri mittaukset oli tehty suunnilleen samalla alueella. Pohjaveden pinnan kohoaminen näytti kuitenkin lisäävän kevätkantavuutta, vaikka sen pitäisi vaikuttaa kantavuutta heikentävästi. Pohjaveden asema riippuu paljon ympäröivästä maastosta, ja tulos olisi ollut parempi, jos mittaukset olisi tehty kussakin kohteessa erikseen.

Edellä kuvatut riippuvuudet ovat yleensä niin heikkoja, että niiden soveltaminen heikoimman kantavuuden ennustumalleiksi ei ole perusteltua (taulukko 6). Riippuvuus on sitä voimakkaampi, mitä lähempänä ykköstä korrelaatiokertoimen itseisarvo on. Kunkin vaikutuksen suunta selviää korrelaatiokertoimen merkistä siten, että positiivinen korrelaatio tarkoittaa ilmiön ja sen selittäjän samansuuntaista kasvua. Heikoin kantavuus on taulukossa kevätkantavuuskertoimen muodossa; määritelmistä seuraa, että kantavuus huononee, kun kevätkantavuuskerroin (kkk) kasvaa.

Taulukko 6: Kevätkantavuuden suuruutta ja ajankohtaa kuvaavat lineaariset regressiomallit vuosien 1987 ja 1988 pudotuspainolaitemittauksiin perustuen. Tarkastelu on tehty piireittäin ja tietyypeittäin.

y=kkk:n suuruus			y=kkk:n ajankohta (päiviä vuoden alusta)		
ed.vuoden pohjavesi (lokakuun tason ja pitkäaikaisen keskiarvon erotus, mm)	ed.talven pakkasmäärä (°C · h)	ed.talven pakkaskauden pituus (vrk)	ed.vuoden pohjavesi (lokakuun tason ja pitkäaikaisen keskiarvon erotus, mm)	ed.talven pakkasmäärä (°C · h)	ed.talven pakkaskauden pituus (vrk)
Kaikki pisteet					
-0.00134	0.000000904	-0.02121	-1.04279	-0.00129	1.291256
0.941793	0.970067	1.548847	161.2655	120.7294	124.2689
-0.06022	0.035503	-0.28381	-0.49068	-0.53163	0.180872
Turku					
-0.01318	0.00000488	-0.03075	2.904762	-0.00108	6.777778
1.237214	1.150843	1.76875	98.04762	117.0852	-19.1111
-0.59096	0.590956	-0.59096	0.852251	-0.85225	0.852251
Vaasa					
0.015872	0.00000545	0.023808	-2.48246	-0.00085	-3.72368
0.908686	1.138448	0.345223	163.1228	127.1873	251.25
0.172605	0.172605	0.172605	-0.53104	-0.53104	-0.53104
Oulu					
-0.00816	-0.000012	-0.03672	-0.62222	-0.00093	-2.8
0.875651	0.491659	2.00999	166	136.7221	252.4889
-0.40221	-0.40221	-0.40221	-0.28868	-0.28868	-0.28868
KAIKKI AB:T					
0.00323	0.00000439	-0.03229	0.055556	-0.00051	1.200767
0.892568	1.029724	1.822941	146.7222	130.6433	112.0153
0.154589	0.192813	-0.44708	0.026925	-0.22511	0.168374
KAIKKI ÖS:T					
-0.00659	-0.0000037	-0.01892	-0.21564	-0.00014	0.865903
1.050675	0.919868	1.544753	153.2608	148.531	128.7751
-0.41996	-0.22966	-0.39715	-0.15425	-0.09526	0.204124
KAIKKI SR:T					
-0.00218	0.00000123	-0.00878	-0.69027	-0.00049	0.535786
0.894258	0.939298	1.156718	168.3757	153.8284	154.0937
-0.08319	0.038171	-0.08836	-0.3052	-0.17462	0.062362

Taulukon tulkinta esim:

0.00000488
1.150843
0.590956

y = kevätkantavuuskertoimen suuruus =

0.00000488 · edellisen talven pakkasmäärä + 1.150843 · Korrelaatiokerroin r = 0.590956.

Kesäkantavuuden vaihtelu

Oulussa mitattujen pohjavesien korkeuksien avulla on osittain selitetty vuoden aikana vaihtelevia kantavuuksia /30, 31/. AB-päällysteisellä maantiellä 815 tierakenteen kosteusvaihtelut, mitä kuvastavat pohjaveden pinnan muutokset, vaikuttavat selvästi kesän aikana mitattuihin kantavuuksiin (taulukko 7).

Heinäkuussa, jolloin kantavuudet ovat korkeimmillaan, pohjaveden pinta on alhaisimmillaan. Pohjaveden tason vaikutus on vähäisempää pudotuspainolaitteella kuin Benkelman-palkilla mitattuihin kantavuuksiin. Öljysorapäälysteisellä maantiellä 8152 pohjaveden pinnan vaihtelut selittävät osittain kantavuuden muutoksia kesäkuun puolivälin jälkeen. Pohjaveden pinta laskee heinäkuun lopulle asti ja samalla kantavuus nousee. Elokuun lopulla pohjaveden pinta on noussut selvästi ja kantavuus (Benkelman) on alentunut heinäkuun loppupuolen tilanteeseen verrattuna. Tällöin kantavuus on kuitenkin selvästi suurempi kuin aikaisemmin kesällä samalla pohjaveden pinnan korkeustasolla (taulukko 8). Sorapäälysteisillä paikallisteillä 18669 ja 18672 pohjaveden pinnan vaihtelu roudan sulamisen jälkeen selittää osittain Benkelman-palkilla mitattuja kantavuuksien muutoksia, mutta ei juurikaan pudotuspainolaitteella mitattuja kantavuuksia.

Taulukko 7: AB-tiellä tehtyjä mittauksia vuonna 1988

Mt 815 Pist. 1, 2, 4	Kantavuus MN/m ²		Pohjaveden etäisyys cm	E-moduulit MN/m ²		
	Benkelman- palkki	Pudotus- painolaite		AB	Kantava	Alempi kerros
03.06.88	88	103	160	2900	91	33
10.06.88	97	99	161	2300	92	32
17.06.88	111	113	174	3300	89	33
01.07.88	120	124	196	3650	90	32
22.07.88	121	-	225	-	-	-
26.08.88	101	127	168	3650	100	33

Taulukko 8: ÖS-tiellä tehtyjä mittauksia vuonna 1988

Mt 8152 pist.2-10	Kantavuus MN/m ²		Troxler		Pohjaveden etäisyys cm	E - moduulit	
	Benkelman- palkki	Pudotus- painolaite	kosteus %	tiheys kg/m ³		Ylempi kerros	Alempi kerros
03.06.88	174	186	4,1	1973	97	318	77
10.06.88	159	175	2,7	1987	98	314	68
17.06.88	158	181	2,6	1978	114	331	69
01.07.88	187	192	1,8	1969	122	358	72
22.07.88	229	-	2,3	1984	158	-	-
26.08.88	198	210	3,8	1996	109	393	77

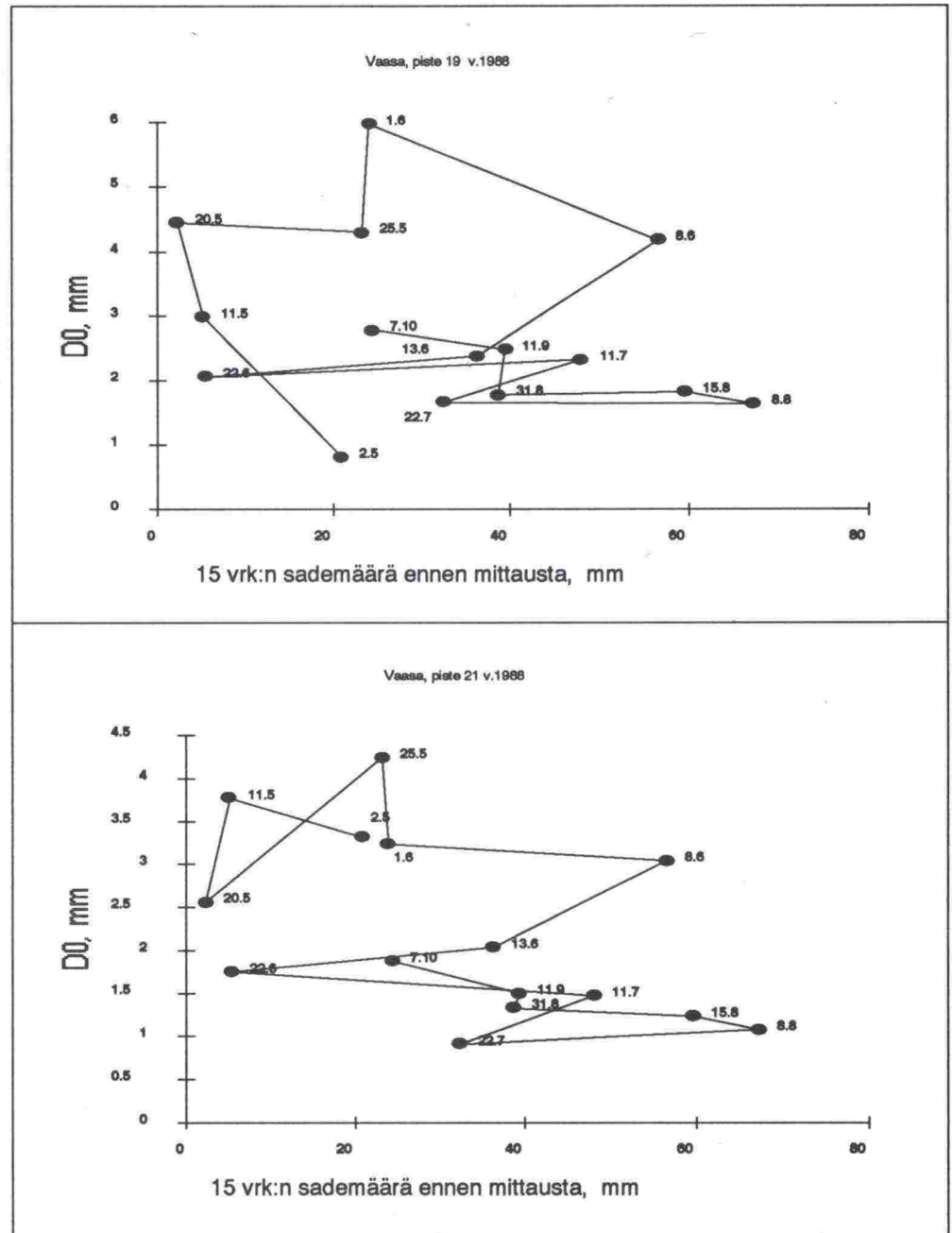
Sorateillä kosteudella on keväällä selvä vaikutus ylemmän kerroksen E-moduuliin. Kosteuden lisääntyessä 1 prosenttiyksikön E-moduuli laskee vajaat 50 MN/m². Kosteus riippuu ennen kaikkea rakeisuudesta, minkä vuoksi rakeisuuden ja E-moduulin välillä on myös selvä riippuvuus. Kesällä kosteuden ja rakeisuuden vaikutukset ylemmän kerroksen E-moduuliin ovat samankaltaisia kuin keväällä. Kesällä ylemmän kerroksen kosteus on keskimäärin vajaan prosenttiyksikön alhaisempi kuin keväällä. Tällöin myös ylemmän kerroksen E-moduuli on korkeampi kuin keväällä /30, 31/.

Kun verrattiin samaan aikaan eri vuosina mitattua kantavuutta edeltäneeseen sademäärään (kesäkantavuutta pyrittiin selittämään sademäärillä), saatiin piireittäin ja päällysteen mukaan ryhmiteltyinä vaihtelevaansuuntaisia riippuvuuksia. Savi- ja turvepohjamailla sade näytti pienentävän kantavuutta. Siltti- ja hiekkamoreenipohjilla vaikutus oli vastakkaissuuntainen, hiekka- ja sorapohjilla vasta pitkän ajan sateet heikensivät kantavuutta.

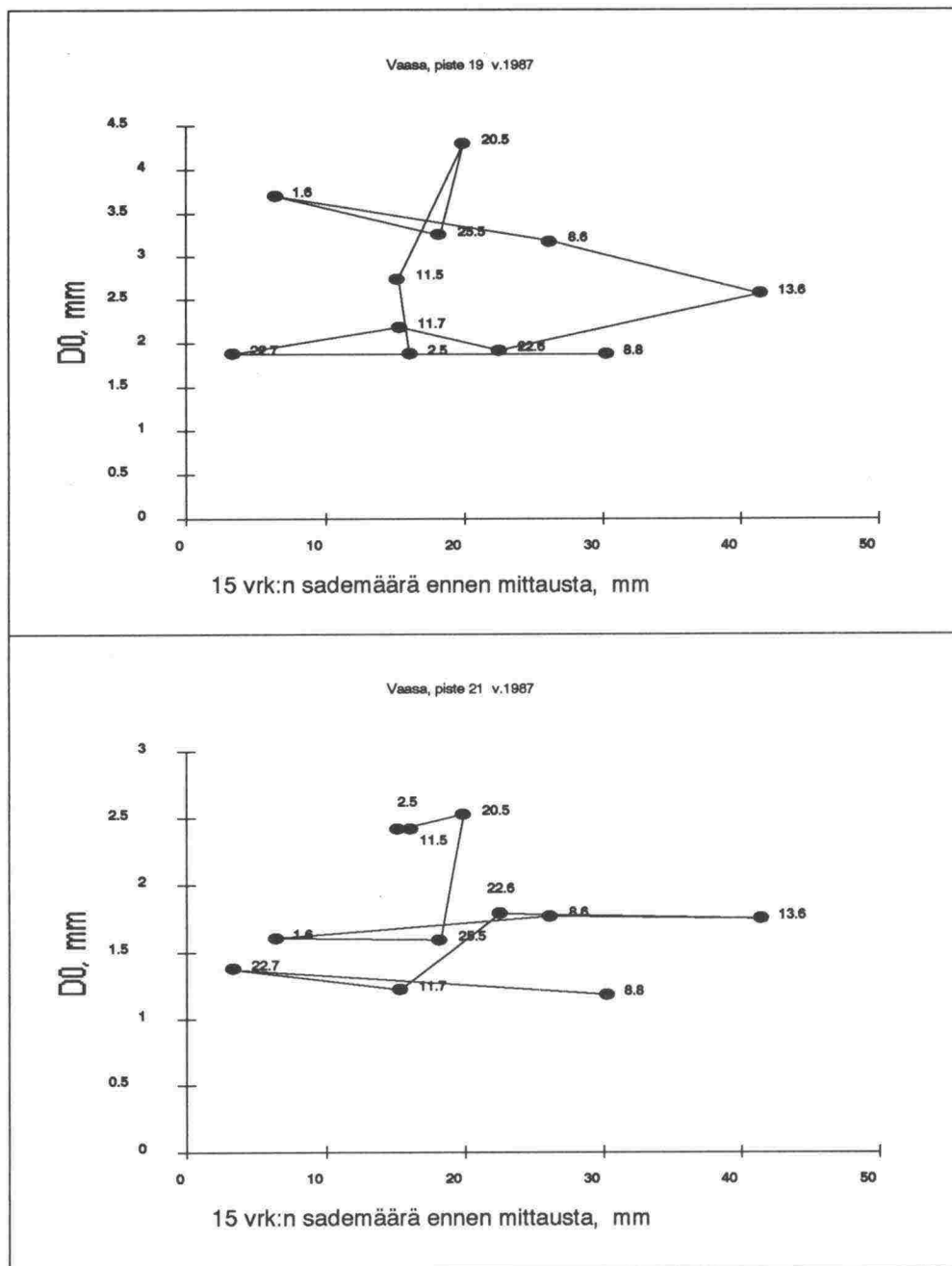
Tierakenteen tiivistymisellä saattaa olla voimakkaampi vaikutus kesäkantavuuden muutoksiin kuin sademäärillä (kuvat 23 ja 24). Pudotuspainolaitteella mitattu painuma, joka on kääntäen verrannollinen kantavuuteen, pienenee kuvien soratiellä syksyyn saakka ilman, että sateilla on siihen nähtävää vaikutusta. Vasta syksyllä alkaa taipumien kasvu, joka on selvästi sateista johtuvaa. Syksyllä haihdunta on kevääseen ja kesään verrattuna pientä. Sateet voivat syksyllä olla kestoaltaan kesäsateita pitempiä, jolloin sadevesi ehtii myös imeytyä tierakenteeseen (lyhyt ja rankka sade suureksi osaksi vain valuu maan pintaa pitkin). Kuvassa 24 esitetyt Vaasan tiepiirin koealueilla tehdyt mittaukset vuonna 1987 on lopetettu ennen syysheikkenemisen aikaa.

4.2.3. Eri tierakennetyyppien kevätkantavuuskertoimet

Mittausaineiston perusteella oli Tiehallituksessa muodostettu piiri-, tietyyppi- ja pohjamaatyyppikohtaiset kevätkantavuuskertoimen vaihtelukuvat mittauskausille 1987 ja -88 /32/. Aineiston perusteella saatua kerrointa voidaan käyttää rakenteen parantamisen suunnittelua tai tierekisteriä varten tehtyjen kantavuusmittausten korjaamisessa kevätkantavuutta vastaavaksi, mikäli tutkimusaineistoon on kuulunut samantyyppinen tie lähipiiristä. Suunnittelua varten kevätkantavuuskertoimen tulisi olla 0,1 yksikköä pienempi hajonnan vuoksi /32/. (kuva 25)

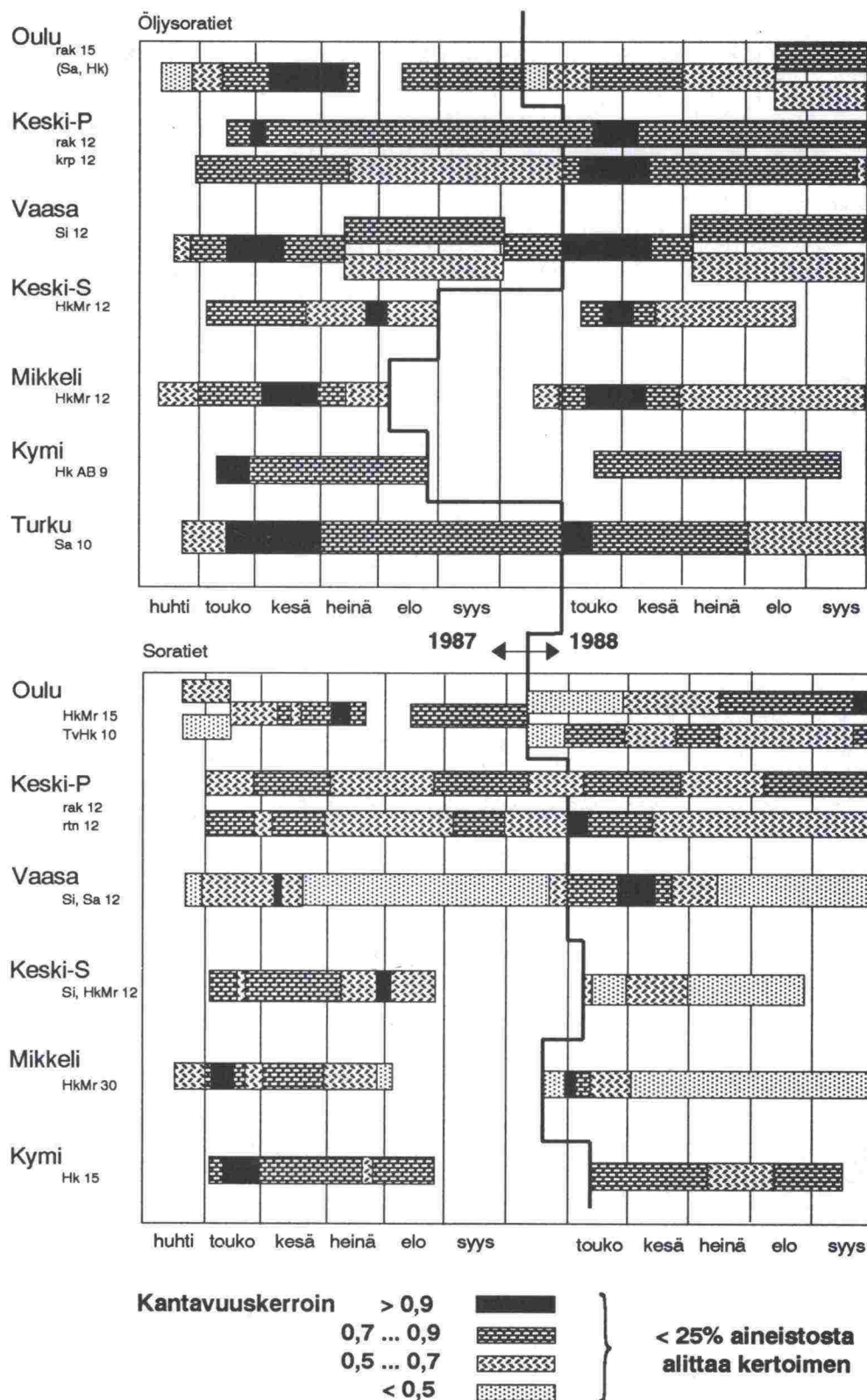


Kuva 23: D0: n riippuvuus mittausta edeltäneestä sademäärästä v. 1988. Soratie Vaasan tiepiiristä.



Kuva 24: D0: n riippuvuus soratiellä mittausta edeltäneestä sademäärästä v. 1987.

Kantavuusseuranta 1987-1988



Kuva 25: Kantavuuskertoimen vaihtelu öljysora- ja sorateilla /32/.

4.3. Taipumasuppilot

4.3.1. Taipumasuppiloiden ja kerrosten E-moduulien yhteys

Pintamoduulit ovat pinnan taipumasta Boussinesq'n yhtälöitä käyttäen laskettuja keskimääräisiä moduuleja. Pintamoduuli etäisyydellä r kuormituslevyn keskeltä lasketaan yhtälöstä:

$$E_0(r) = [(1 - \mu^2) \sigma_0 \cdot a^2] / [r \cdot d(r)] \quad (20)$$

missä $E_0(r)$ on pintamoduuli etäisyydellä r kuormituslevyn keskeltä, MN/m²

r on geofonin etäisyys, m

μ on suppeumaluku

$d(r)$ on taipuma etäisyydellä r kuormituslevyn keskeltä, m

Jos rakenne muunnetaan homogeeniseksi ekvivalenttirakenteeksi Odemarkin tapaan, niin syvyydellä r kantavuus on likimäärin pintamoduulin $E_0(r)$ suuruinen. Mittaamalla kuormituksen aiheuttama taipuma eri etäisyyksiltä saadaan siis tietoa tierakenteen kantavuuden muutoksista ekvivalenttisyvyyden funktiona. Jotta ekvivalenttipaksuudet voidaan määrittää, tarvitaan todelliset kerrospaksuudet ja tiedot E-moduuleista. Kun E-moduulit ja kerrospaksuudet tunnetaan, voidaan aina laskea teoreettiset tien pinnan taipumat. Kerrosten E-moduulien määrittäminen taipumasuppilosta on siksi aina teoreettisesti lasketun taipuman iteratiivista sovittamista mitattuun taipumaan. Suuri epävarmuustekijä on todellisten kerrospaksuuksien poikkeaminen suunnitelluista arvoista. Toisaalta etäällä mitatut taipumat ovat lukuarvoltaan jo niin pieniä, että mahdollisuus suureen suhteelliseen virheeseen on aina olemassa. Kovin monen eri kerroksen selvittäminen ei siksi kannata, varsinkaan jos kerrosten ominaisuudet ovat lähellä toisiaan.

4.3.2. Koealueiden taipumasuppiloiden ja niistä määritettyjen kerrosten E-moduulien ajallinen vaihtelu

Pudotuspainolaitella mitattujen etäistaipumien vaihtelun ja eri tekijöiden vaikutuksen havainnollistamiseksi on esitetty eräistä mittauspisteistä rakennekuvat, ylemmän ja alemman kerroksen E-moduulien ja kantavuuksien vaihtelua esittävät kuvat sekä taipumasuppilot kahdelta vuodelta. Rakenneluokittelu materiaalin kahden läpäisyarvon perusteella on sivulla 44. Tarkastellaan erikseen alueellisten erojen, päällystetyypin ja pohjamaan vaikutusta. Rakenteet on laskettu kaksikerrosmallilla siten, että ylemmän kerroksen paksuus oli kaikissa pisteissä 40 cm.

1. Alueelliset erot (kuvat 26 - 37). Verrataan kolmea rakenteeltaan suunnilleen samanlaista öljysoratietä Turun, Vaasan ja Oulun tiepiireissä. Kun otetaan huomioon mittausten ajallinen epäsäännöllisyys ja mittausten luonteeseen kuuluva

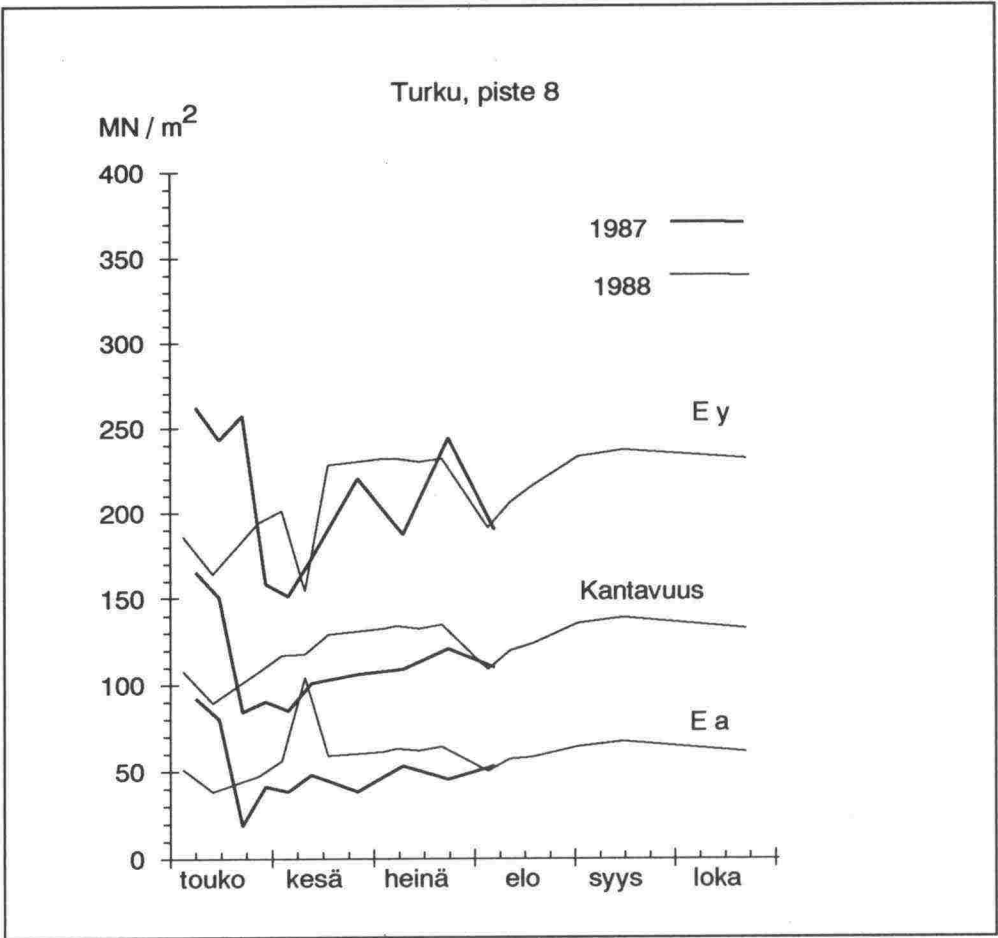
hajonta, ilmaston erojen vaikutus näkyy selvänä vaihesiirtona kevään heikoimman kantavuuden ajankohdassa vasta, kun toisiinsa verrataan Turkua ja Oulua. Kylmän talven jälkeen vuonna 1987 mitatut kantavuudet poikkeavat vuoden 1988 mittauksista enemmän Turussa ja Vaasassa kuin Oulussa.

2. Päälystetyypit (kuvat 38 - 49). Verrataan samalla alueella (Vaasan tiepiirissä) sijaitsevaa asfaltti- öljysora- ja soratietä. Kantavuuden vaihtelu on selvästi erimuotoista kaikilla kolmella tiellä. Syksyllä AB-tien kantavuus nousee (johtuu asfaltin jäykistymisestä lämpötilan laskiessa), mutta ÖS- ja soratien kantavuudet alenevat. Suuri ero kantavuuden vaihteluissa selittyy erilaisilla päälysrakennepaksuuksilla. Kantavuuksissa ei ole käytetty lämpötilakorjausta.

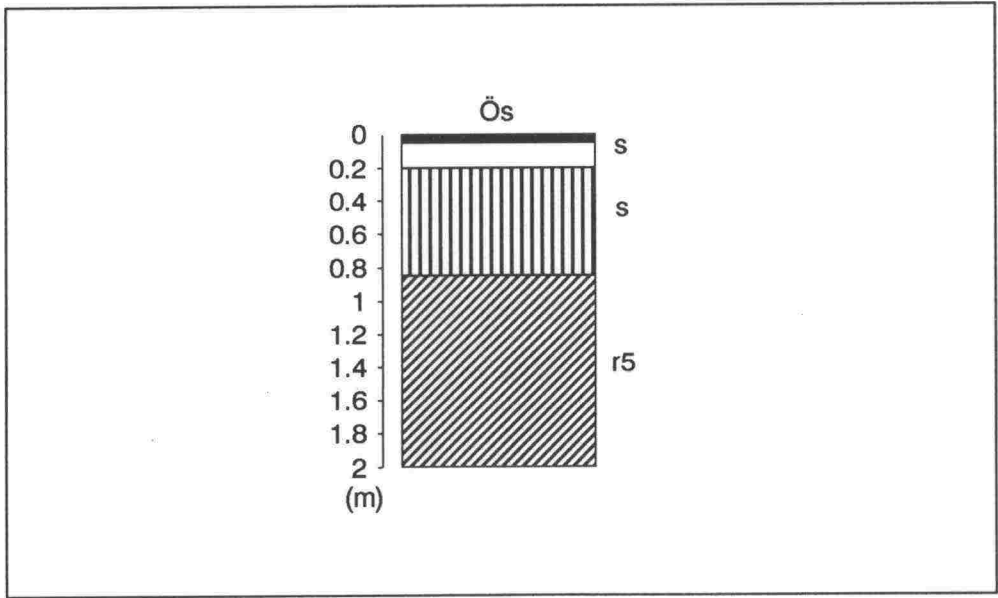
3. Pohjamaaluokat (kuvat 50 - 77). Verrataan Oulun tiepiirin soratiekoealueilla sijaitsevia pisteitä, joiden alusrakenne kuuluu eri maalajiluokkiin. Maalajien sulamisnopeudessa on selvästikin eroja. Eniten muista poikkeaa turve, joka sulaa yllättävän myöhään. Alusrakenteen kantavuuden muutokset ovat kevään jälkeen melko vaihtelevia päälysrakenteeseen verrattuna.

Joissakin kuvissa selvästi erottuvat piikit johtuvat mittauslaitteessa olleesta viasta tai mittausvirheestä eikä äkillisestä kantavuuden muutoksesta, mikä parhaiten selviää suppilokuvista. Yöpakkaset saattavat toki myös lisätä kantavuutta, mutta niiden vaikutus ei ulottune alempaan kerrokseen.

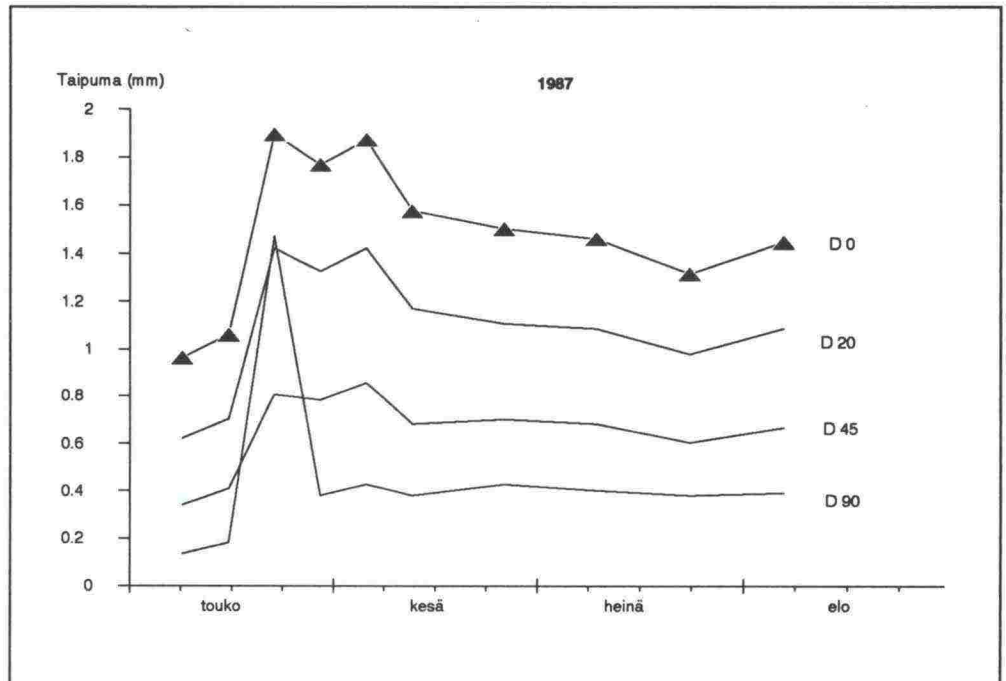
Sorateilla pinnan pehmeys ja kunnossapitohöyläykset aiheuttavat mittauksiin hajontaa, mikä kuvissa ilmenee laskettujen ylemmän ja alemman kerroksen E-moduulien jyrkkänä vaihteluna. Hyväkuntoinen päälyste, AB tai ÖS, tasoittaa selvästi kantavuusvaihteluja.



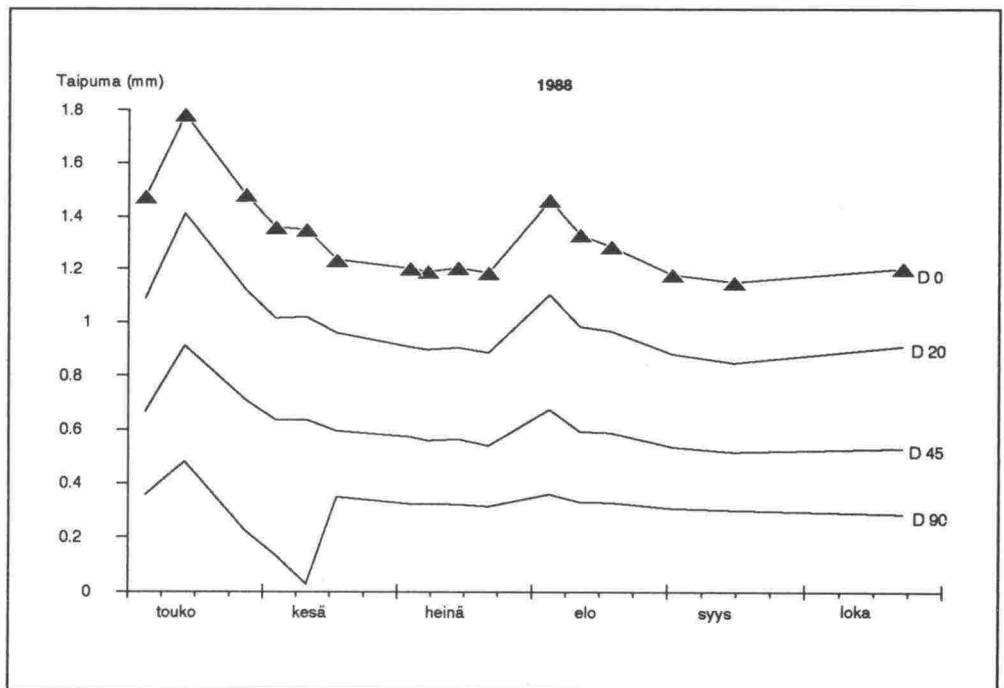
Kuva 26: Ylemmän ja alemman kerroksen E-moduulien ja kantavuuden vaihtelu vuosina 1987 ja 1988. Piste 8, Turku



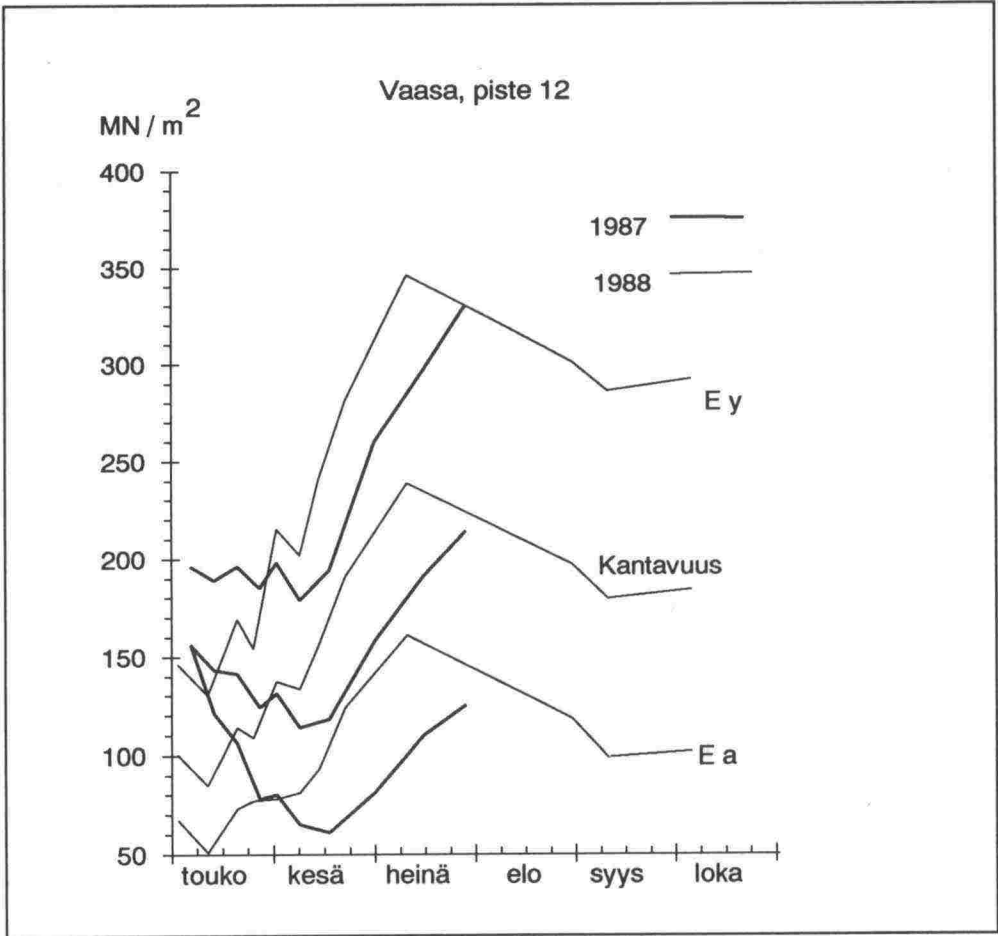
Kuva 27: Rakennekerrokset. Piste 8, Turku.



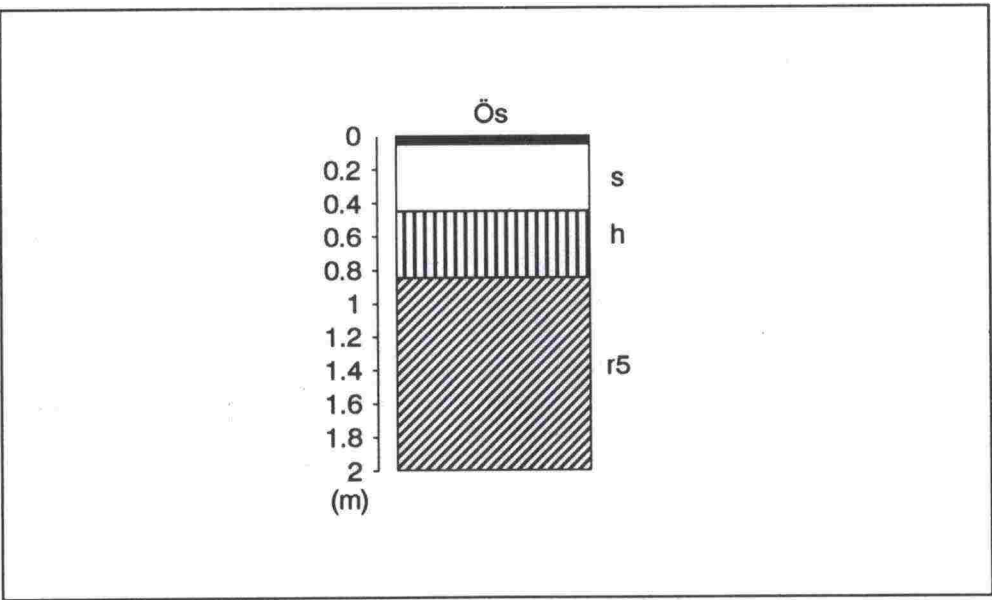
Kuva 28: Mitatut taipumasuppilot vuonna 1987. Turku, piste 8.



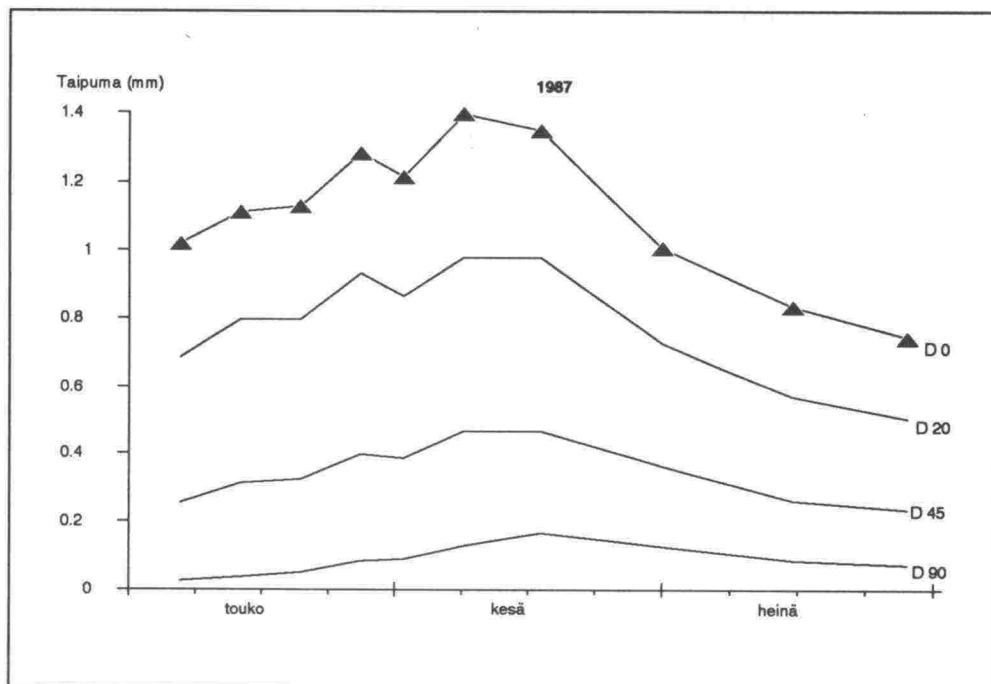
Kuva 29: Mitatut taipumasuppilot vuonna 1988 Turku, piste 8.



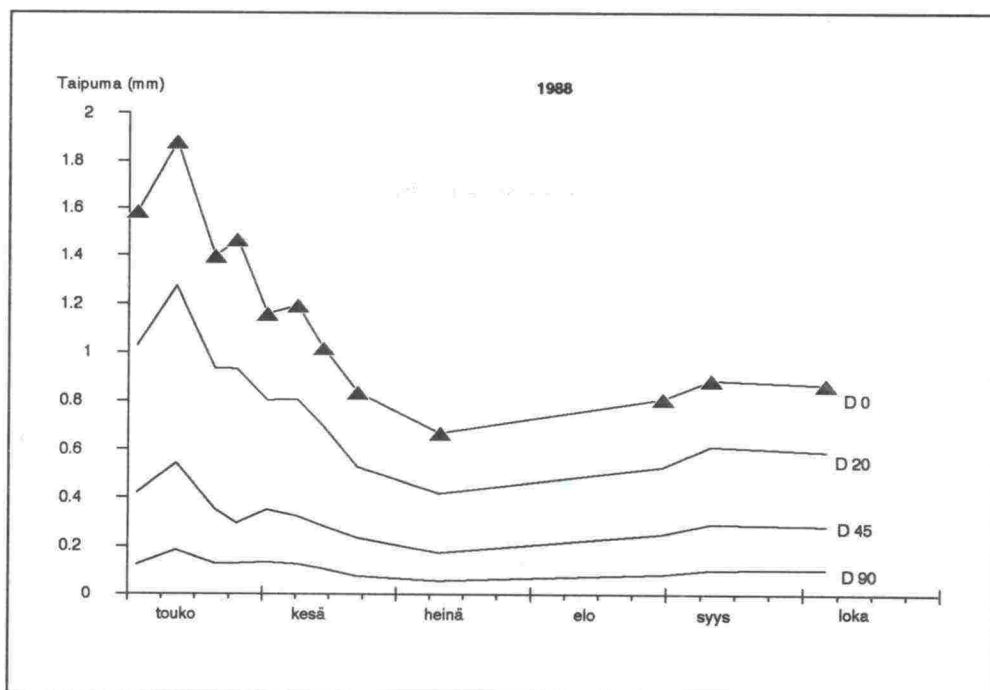
Kuva 30: Ylemmän ja alemman kerroksen E-moduulien ja kantavuuden vaihtelu vuosina 1987 ja 1988. Piste 12, Vaasa.



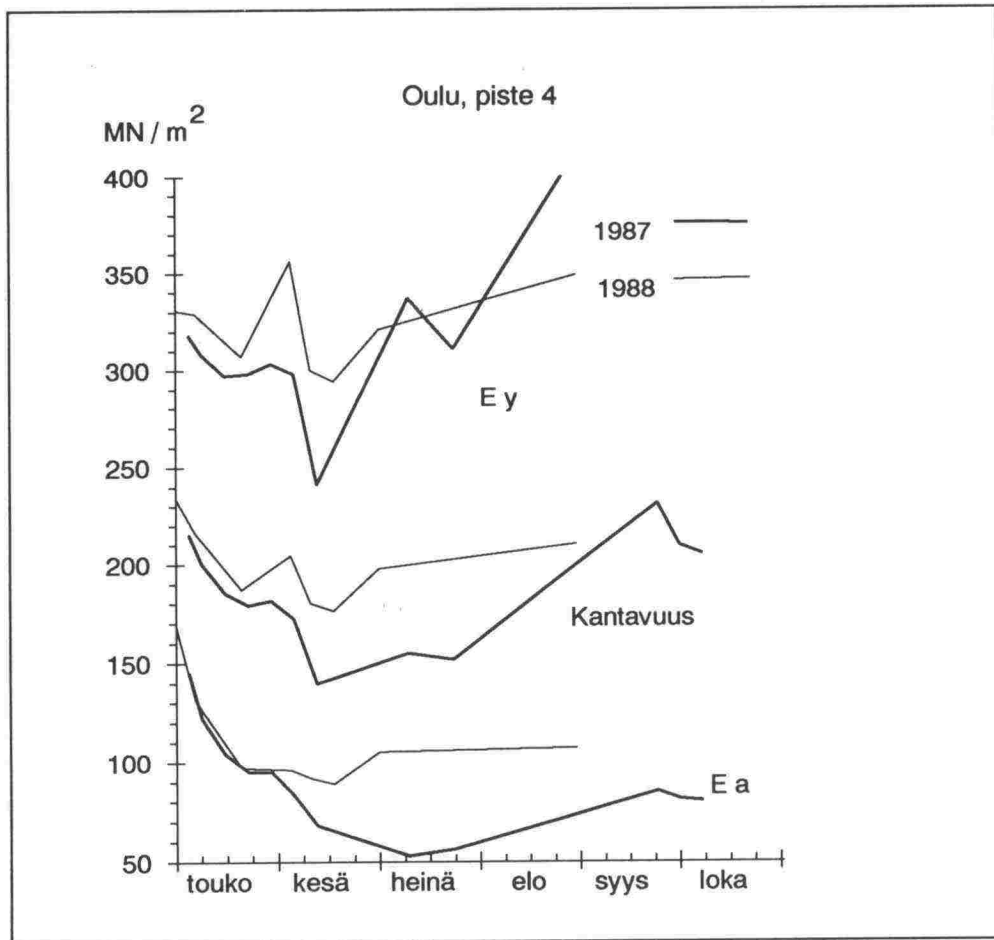
Kuva 31: Rakennekerrokset. Piste 12, Vaasa.



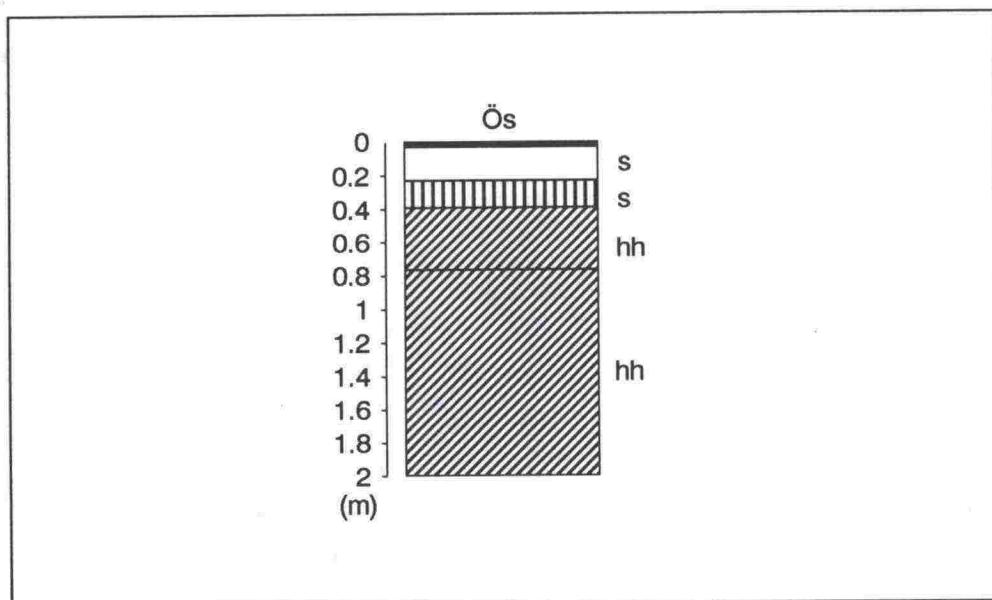
Kuva 32 Mitatut taipumasuppilot vuonna -87. Vaasa, piste 12.



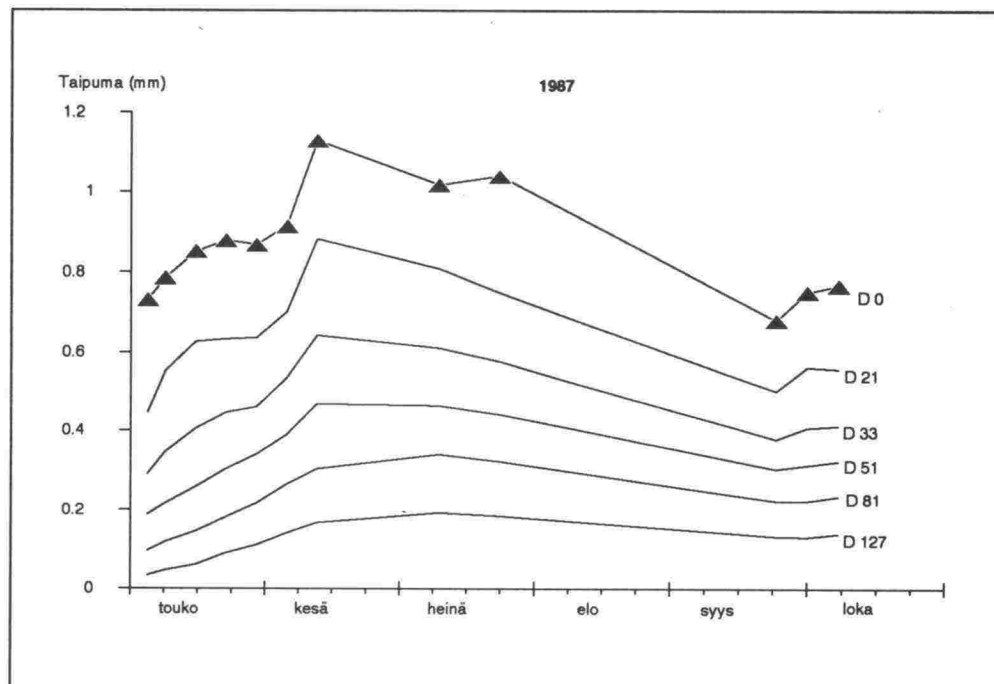
Kuva 33: Mitatut taipumasuppilot vuonna -88. Vaasa, piste 12.



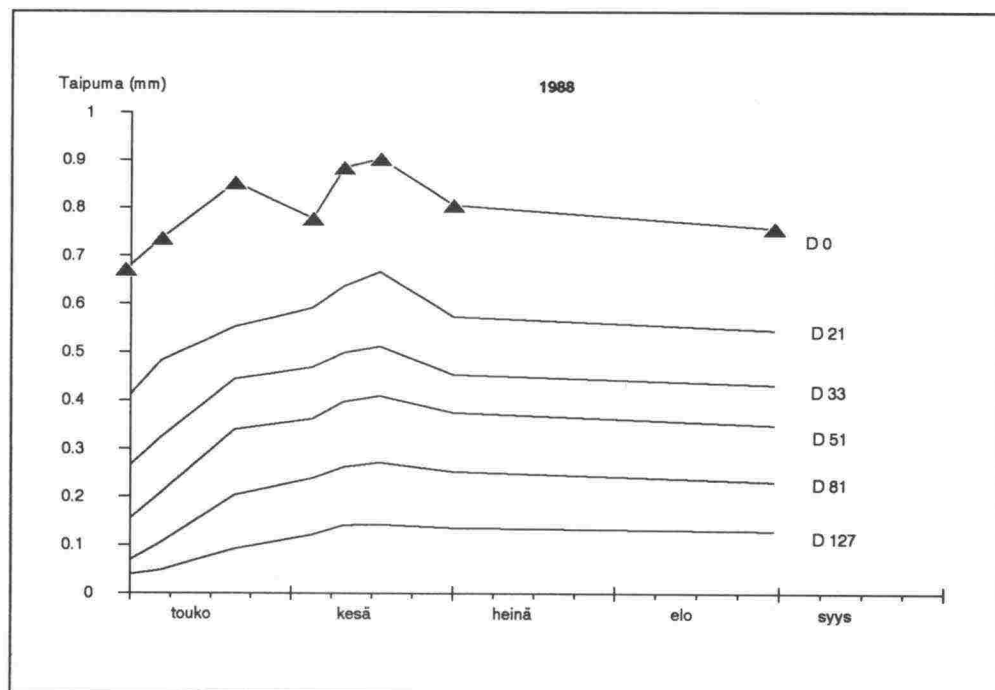
Kuva 34: Ylemmän ja alemman kerroksen E-moduulien ja kantavuuden vaihtelu vuosina 1987 ja 1988. Piste 4, Oulu.



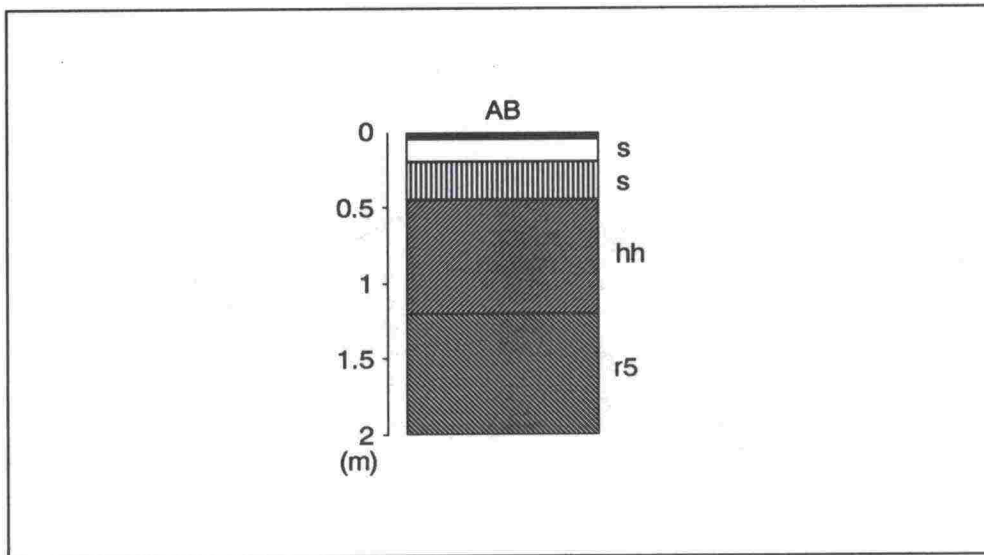
Kuva 35: Rakennekerrokset. Piste 4, Oulu.



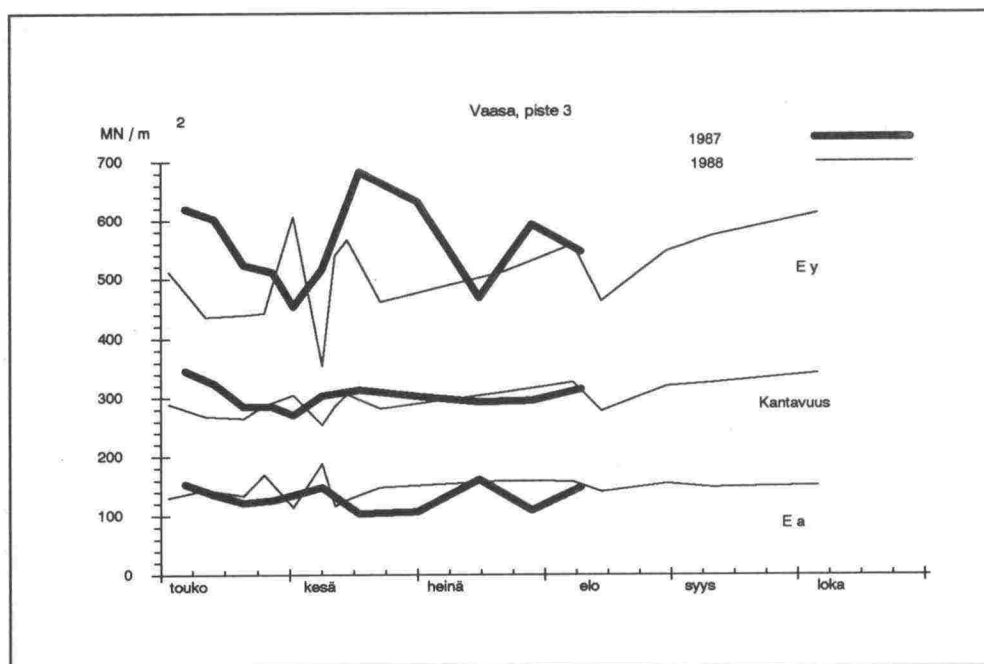
Kuva 36: Mitatut taipumasuppilot vuonna -87. Oulu, piste 4.



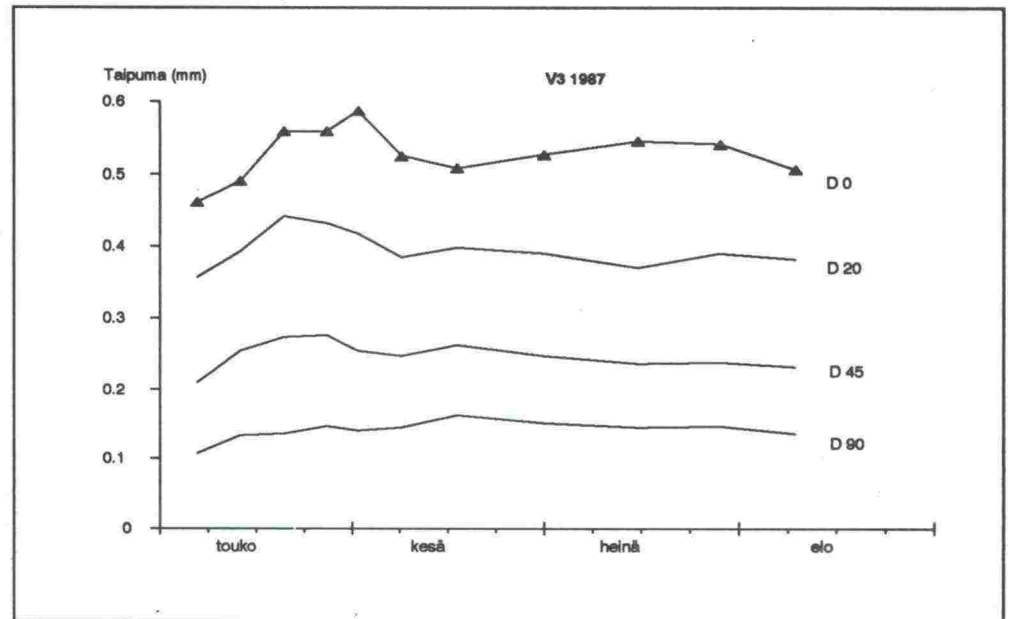
Kuva 37: Mitatut taipumasuppilot vuonna -88. Oulu, piste 4.



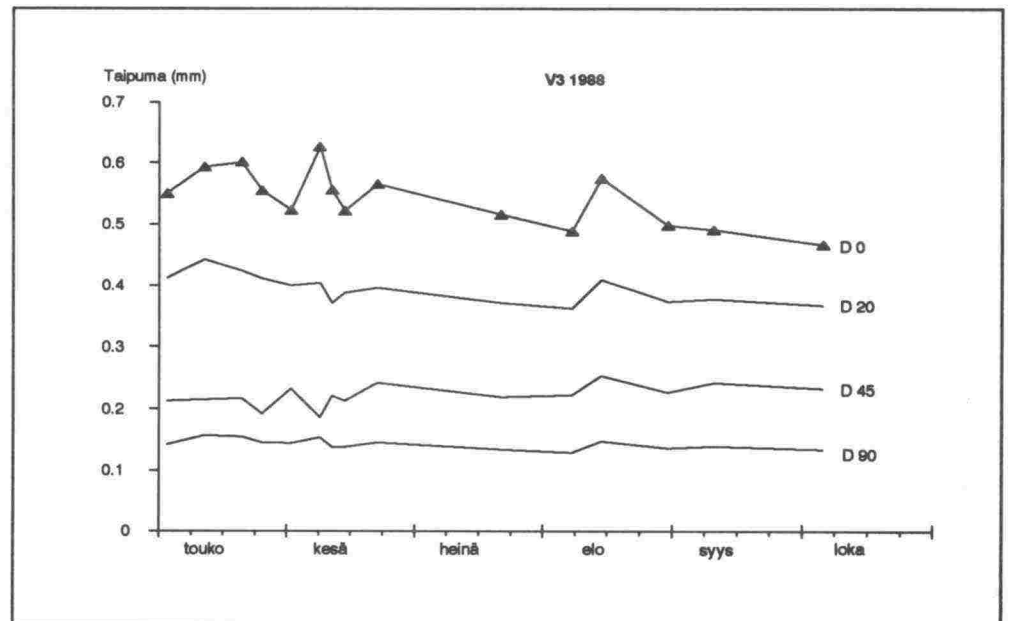
Kuva 38: Piste 3, Vaasa. Rakennekerrosten materiaaliluokat ja paksuudet.



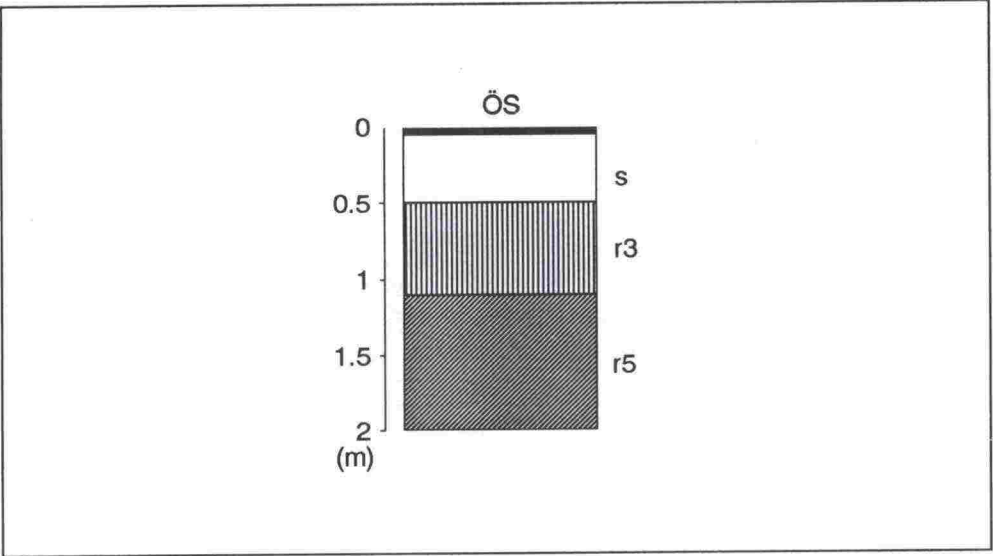
Kuva 39: Ylemmän ja alemman kerroksen E-moduulien ja kantavuuden vaihtelu vuosina 1987 ja 1988. Piste 3, Vaasa.



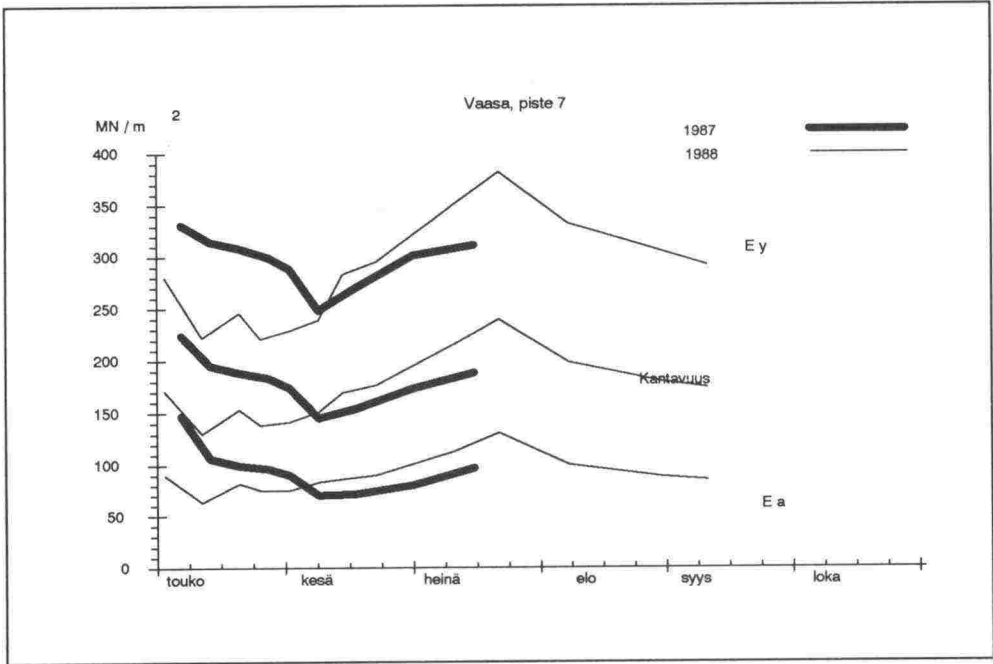
Kuva 40: Mitatut taipumasuppilot vuonna 1987. Piste 3, Vaasa.



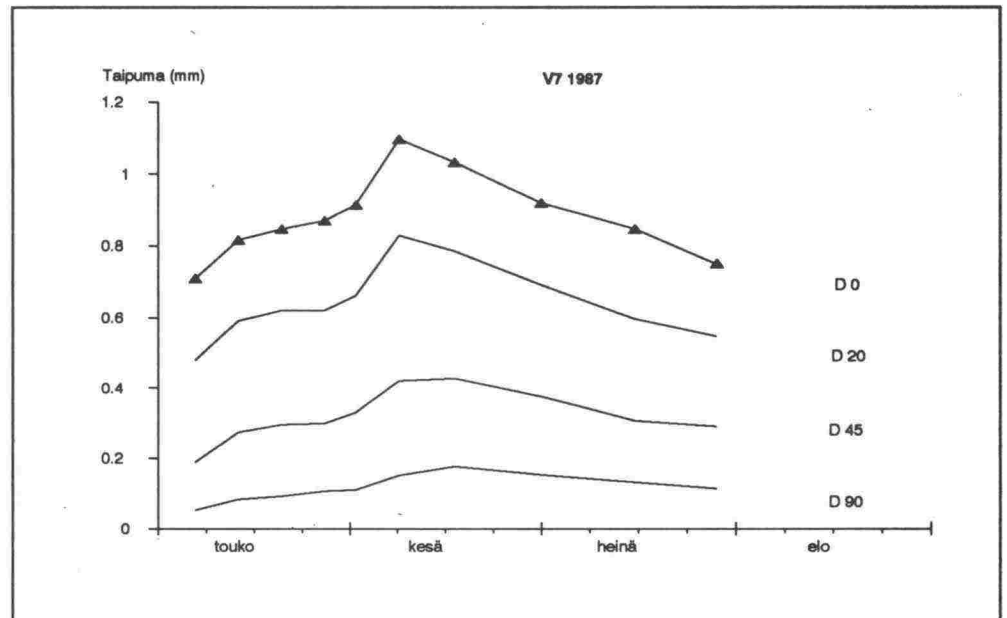
Kuva 41: Mitatut taipumasuppilot vuonna 1988. Piste 3, Vaasa.



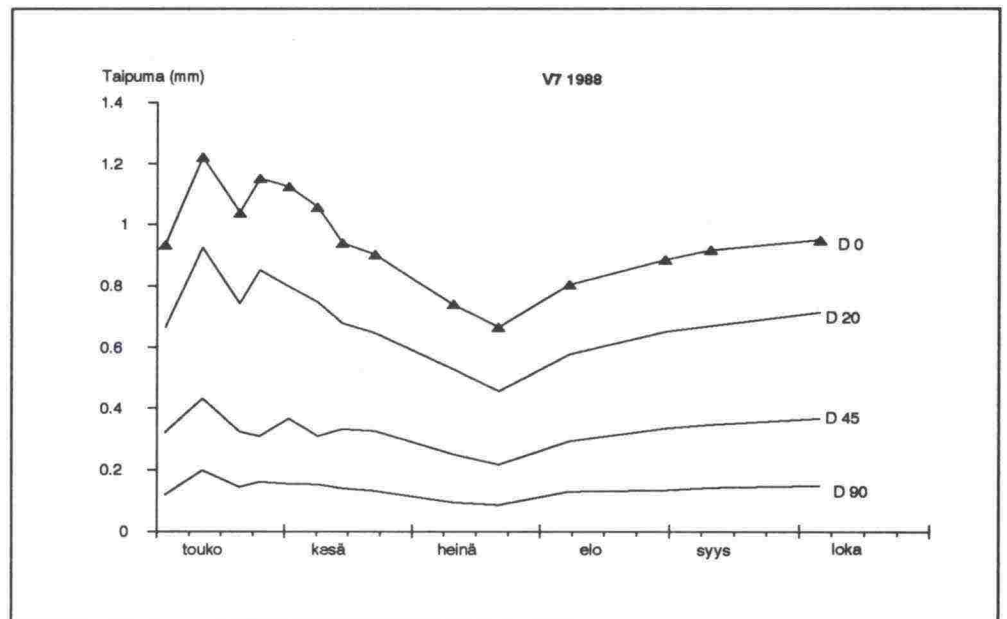
Kuva 42: Piste 7, Vaasa. Rakennekerrosten materiaaliluokat ja paksuudet.



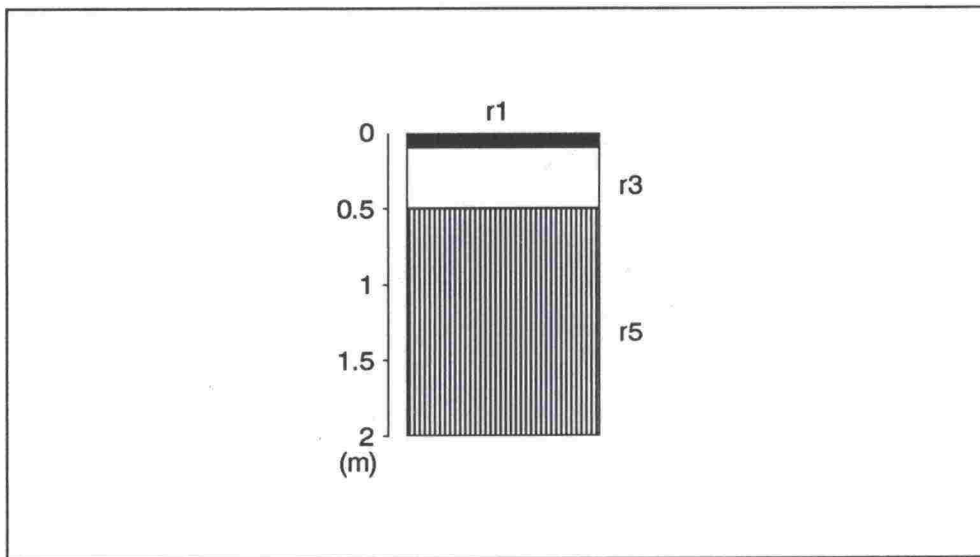
Kuva 43: Ylemmän ja alemman kerroksen E-moduulien ja kantavuuden vaihtelu vuosina 1987 ja 1988. Piste 7, Vaasa.



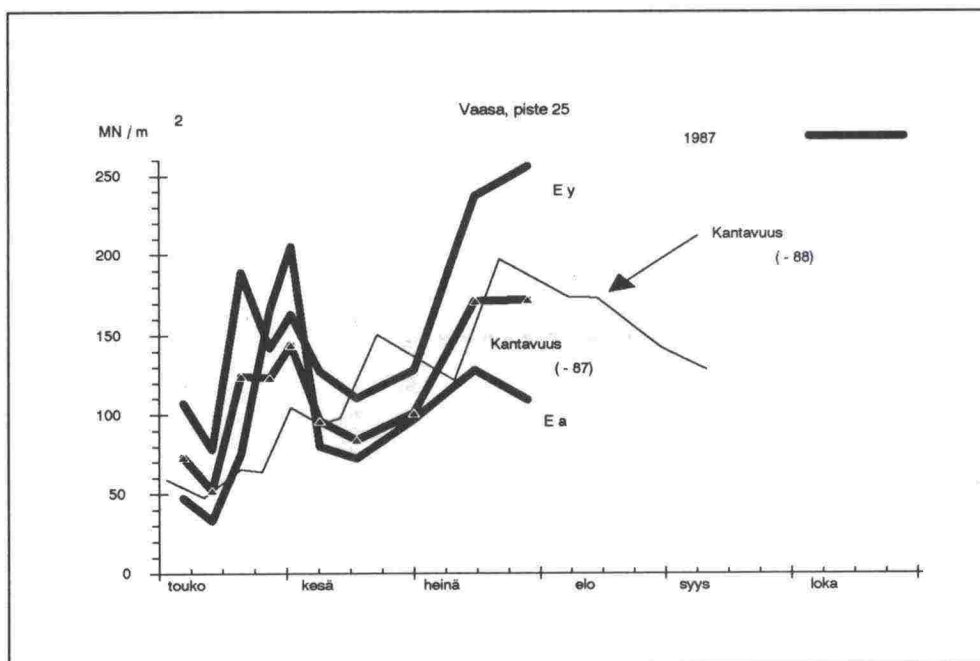
Kuva 44: Mitatut taipumasuppilot vuonna 1987. Piste 7, Vaasa.



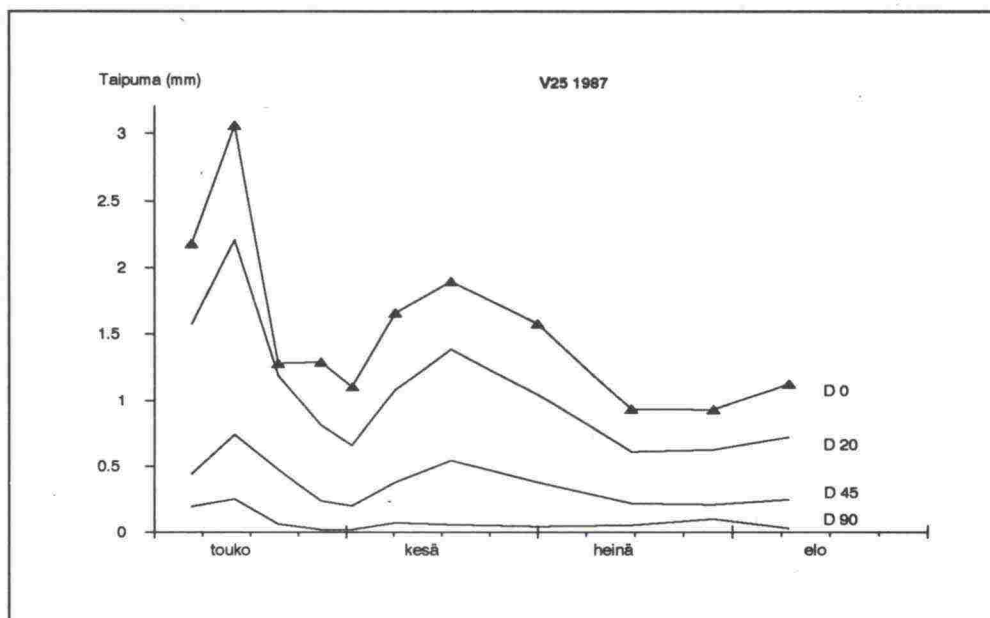
Kuva 45: Mitatut taipumasuppilot vuonna 1988. Piste 7, Vaasa.



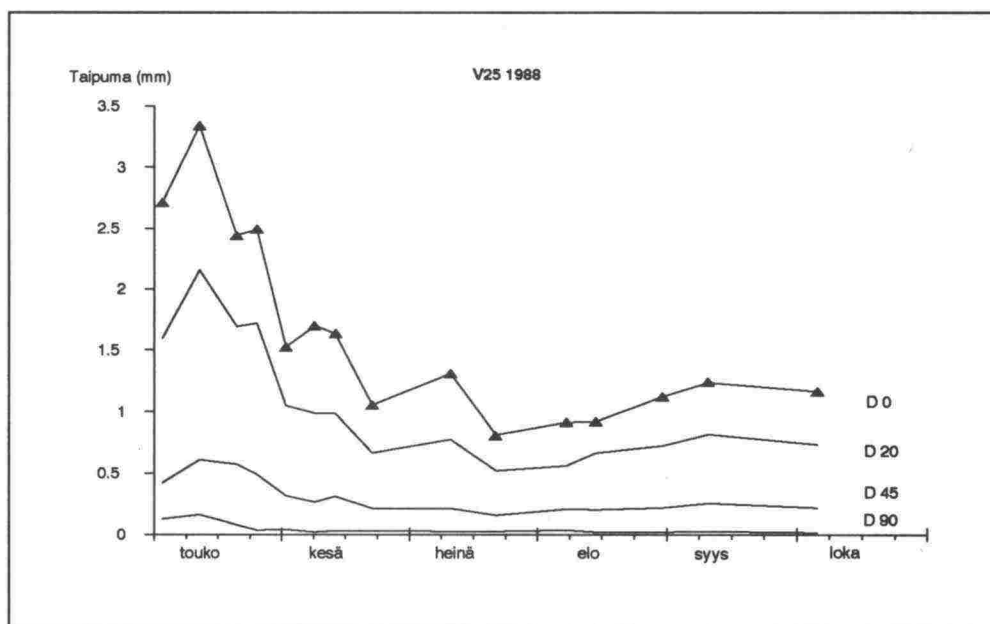
Kuva 46: Piste 25, Vaasa. Rakennekerrosten materiaaliuokat ja paksuudet.



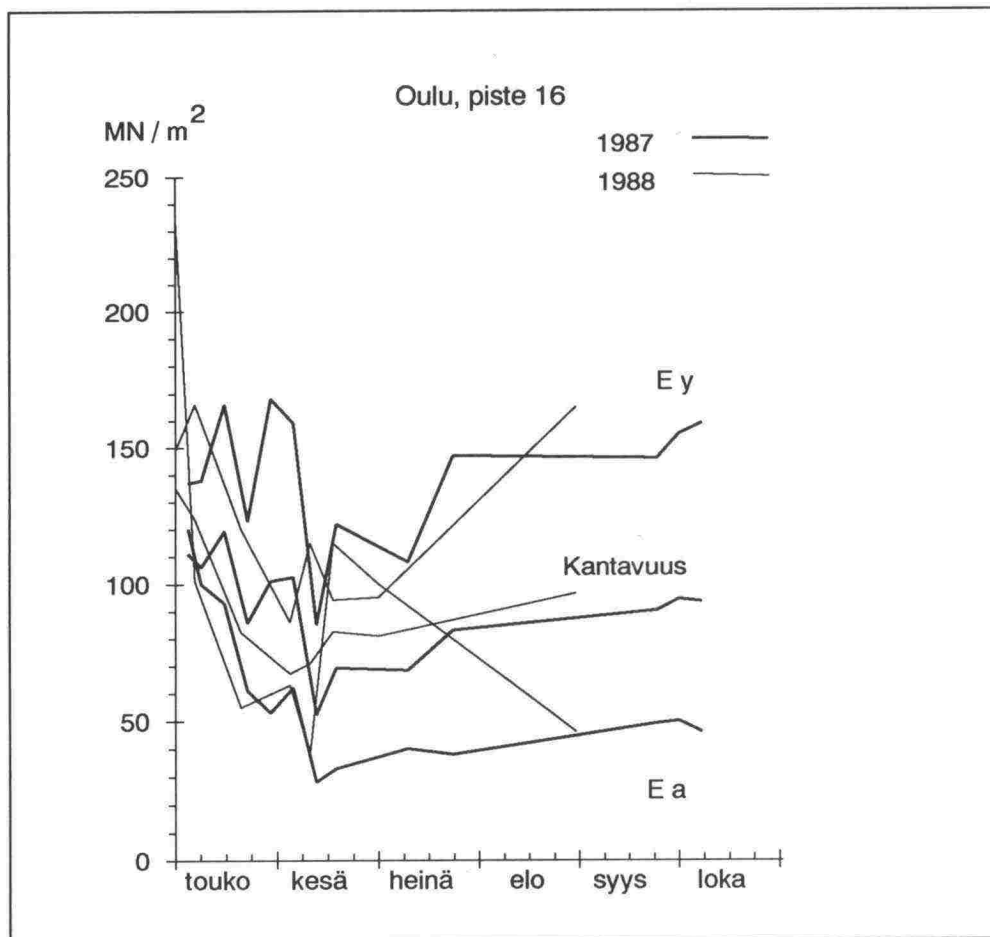
Kuva 47: Ylemmän ja alemman kerroksen E-moduulien ja kantavuuden vaihtelu vuosina 1987 ja 1988. Piste 25, Vaasa.



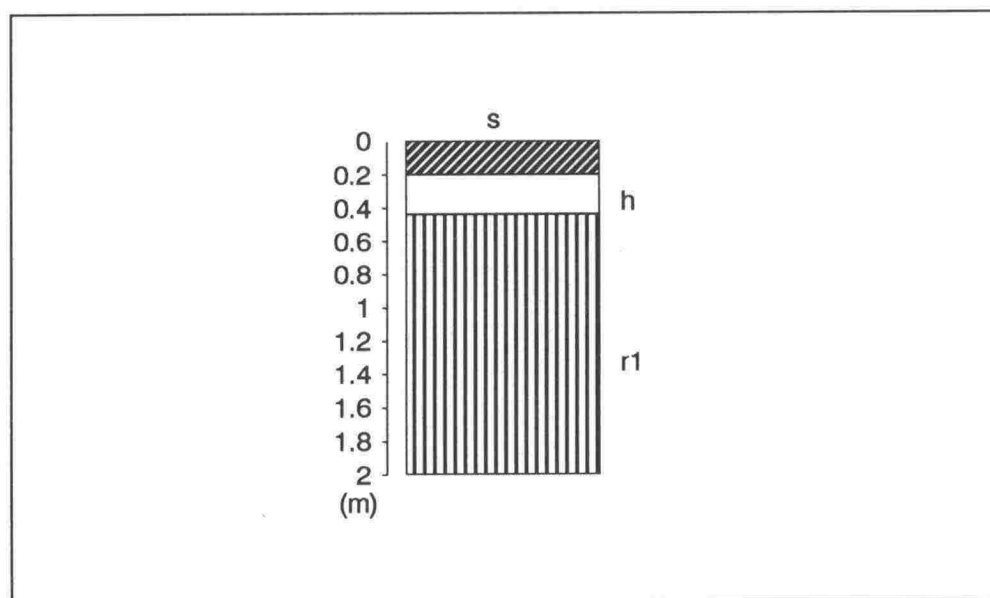
Kuva 48: Mitatut taipumasuppilot vuonna 1987. Piste 25, Vaasa.



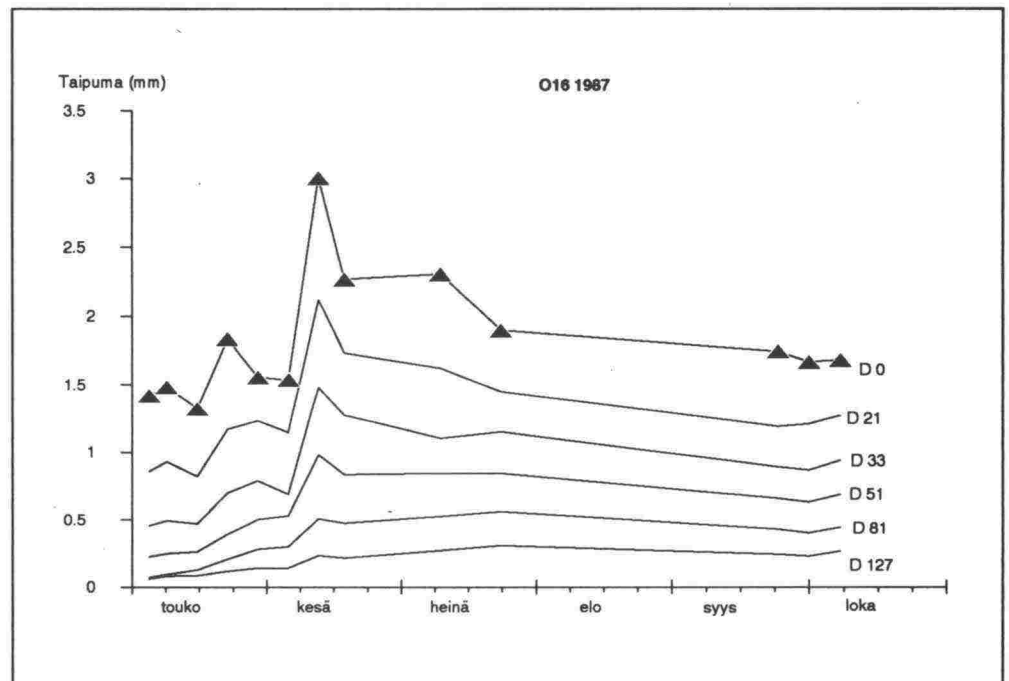
Kuva 49: Mitatut taipumasuppilot vuonna 1988. Piste 25, Vaasa.



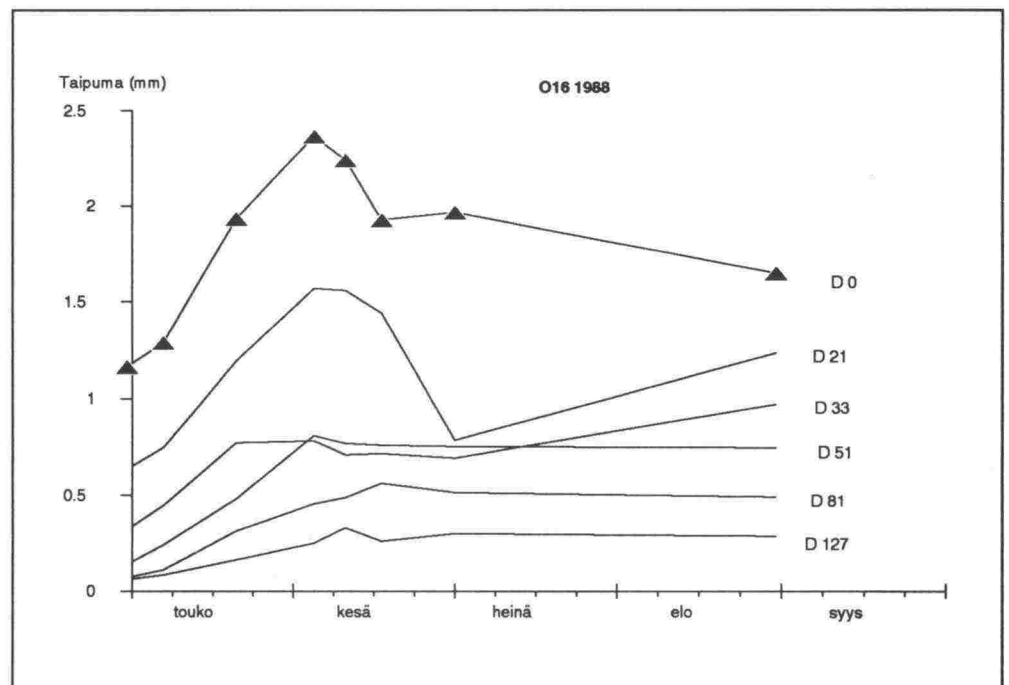
Kuva 50: Ylemmän ja alemman kerroksen E-moduulit ja kantavuus. Piste 16, Oulu.



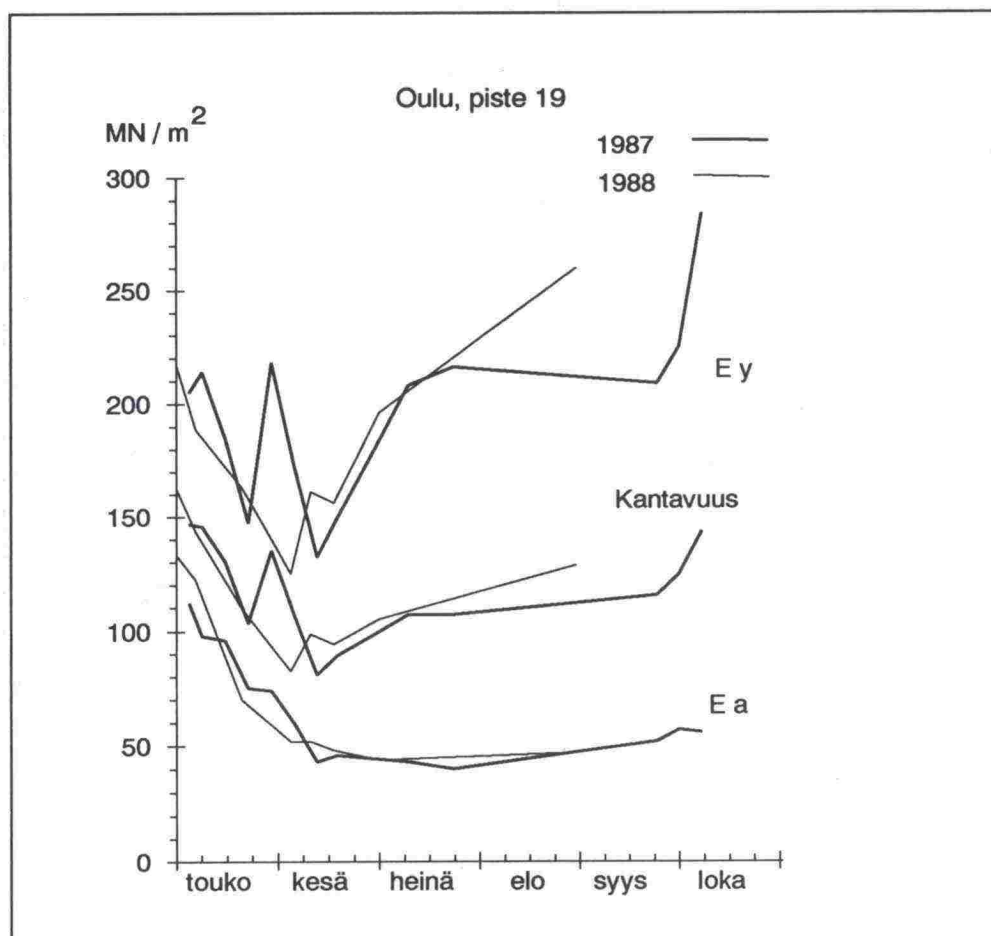
Kuva 51: Piste 16, Oulu. Rakennekerrosten materiaaliluokat ja paksuudet.



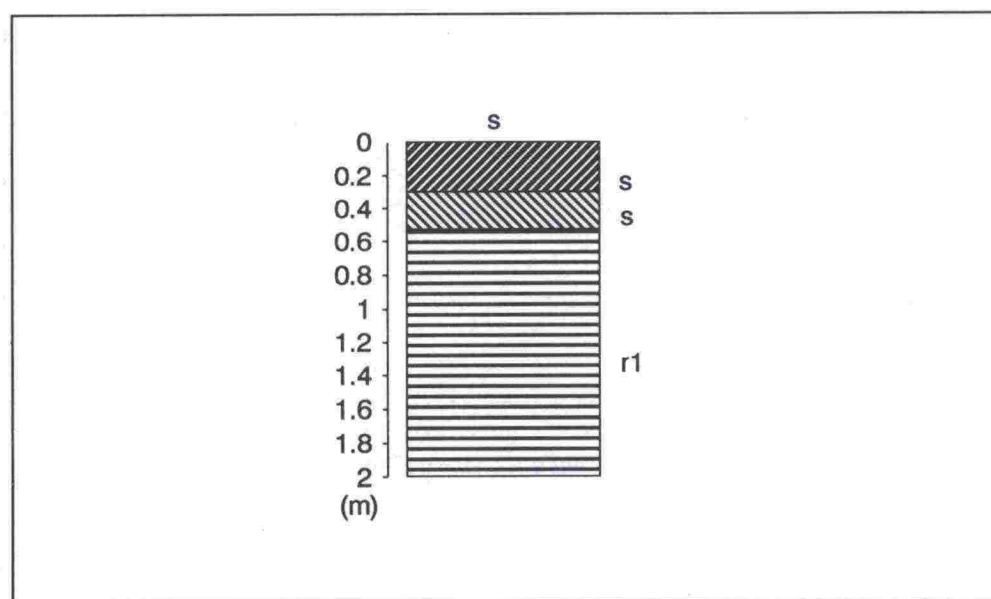
Kuva 52: Mitatut taipumasuppilot vuonna 1987. Piste 16, Oulu.



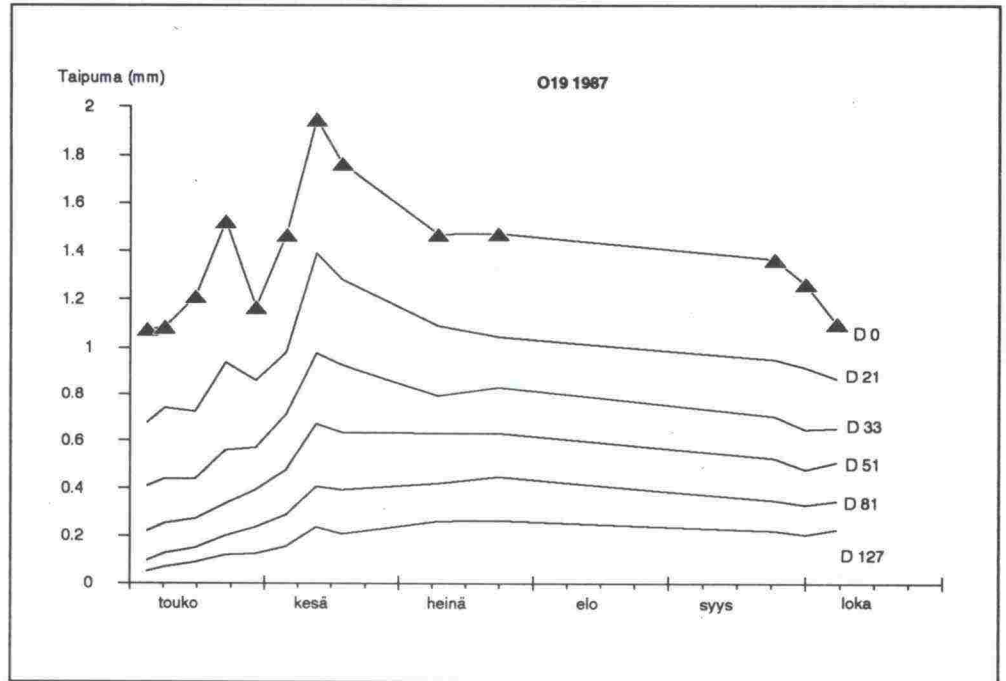
Kuva 53: Mitatut taipumasuppilot vuonna 1988. Piste 16, Oulu.



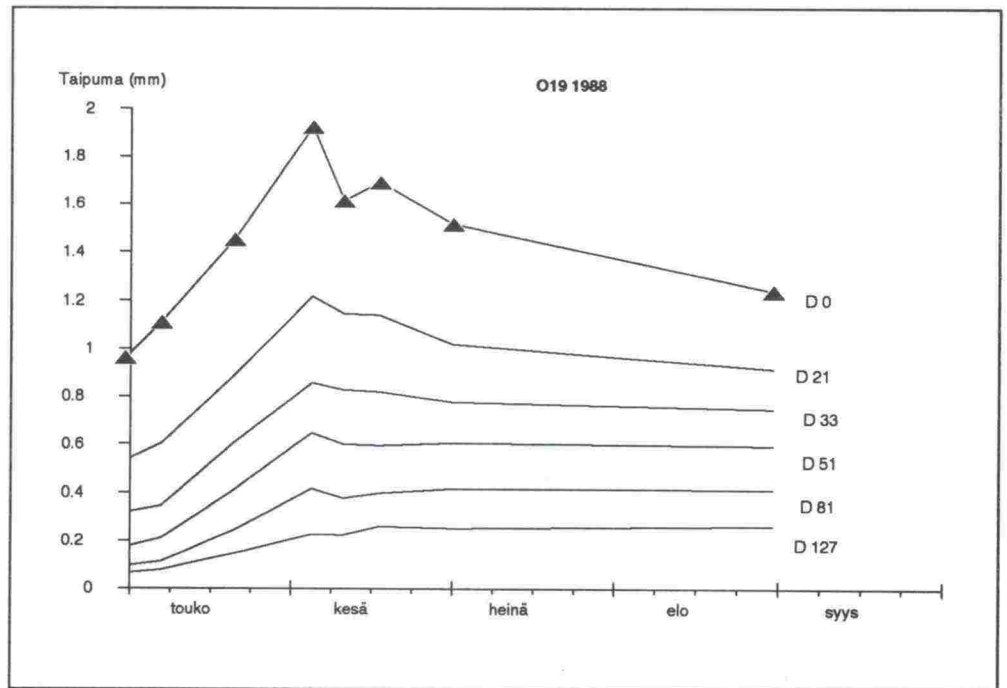
Kuva 54: Ylemmän ja alemman kerroksen E-moduulit ja kantavuus. Piste 19, Oulu.



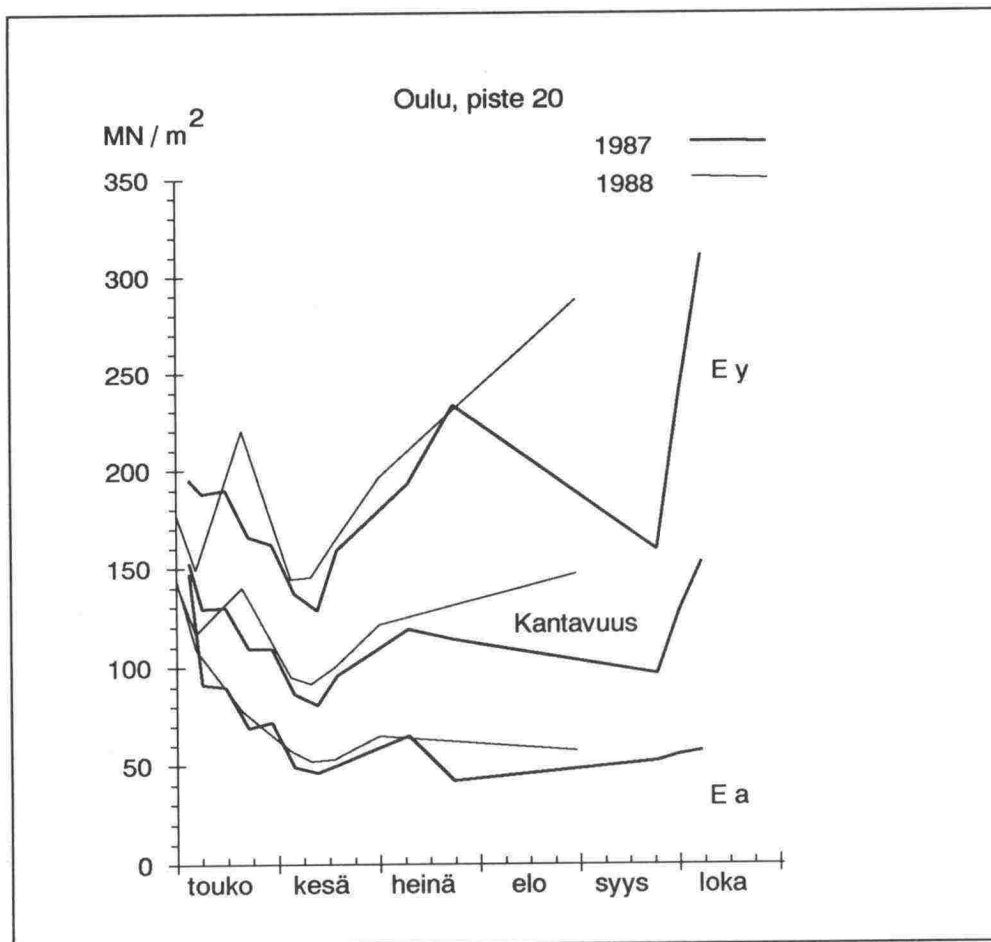
Kuva 55: Piste 19, Oulu. Rakennekerrosten materiaaliluokat ja paksuudet.



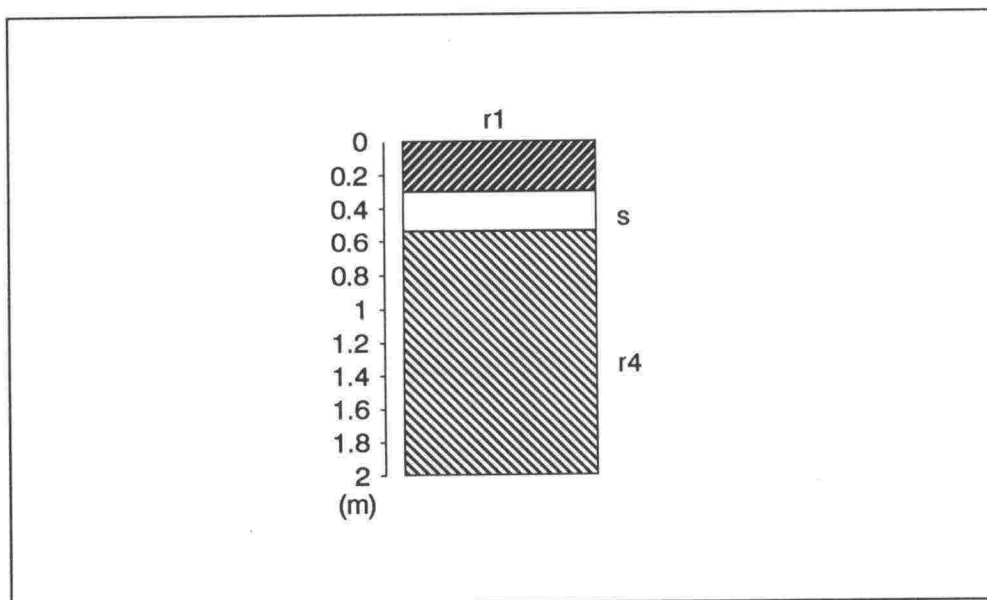
Kuva 56: Mitatut taipumasuppilot vuonna 1987. Piste 19, Oulu.



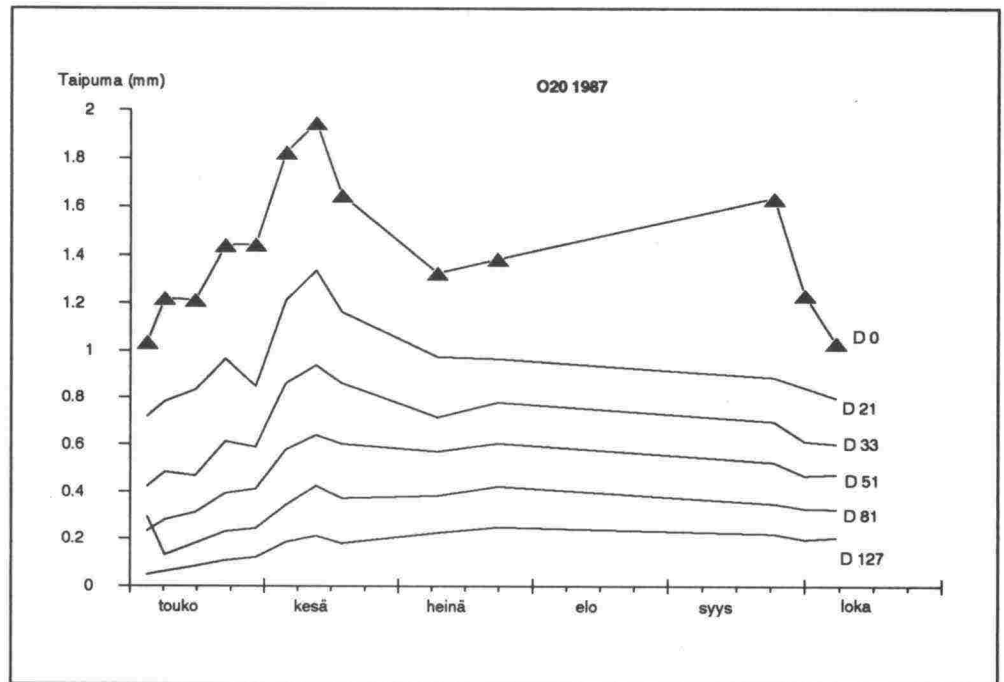
Kuva 57: Mitatut taipumasuppilot vuonna 1988. Piste 19, Oulu.



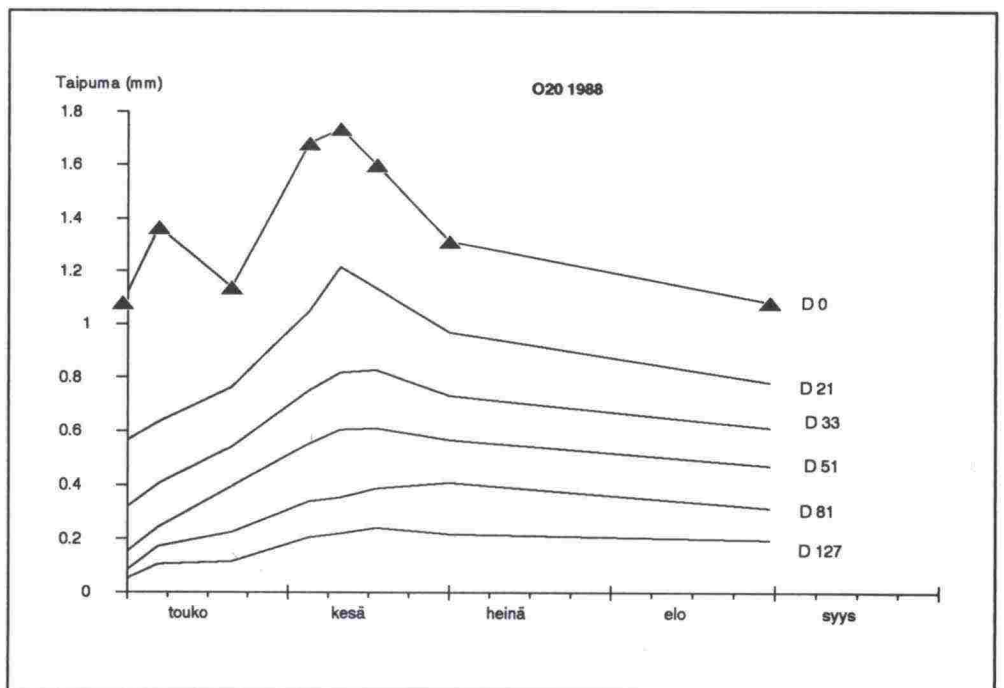
Kuva 58: Ylemmän ja alemman kerroksen E-moduulit ja kantavuus. Piste 20, Oulu.



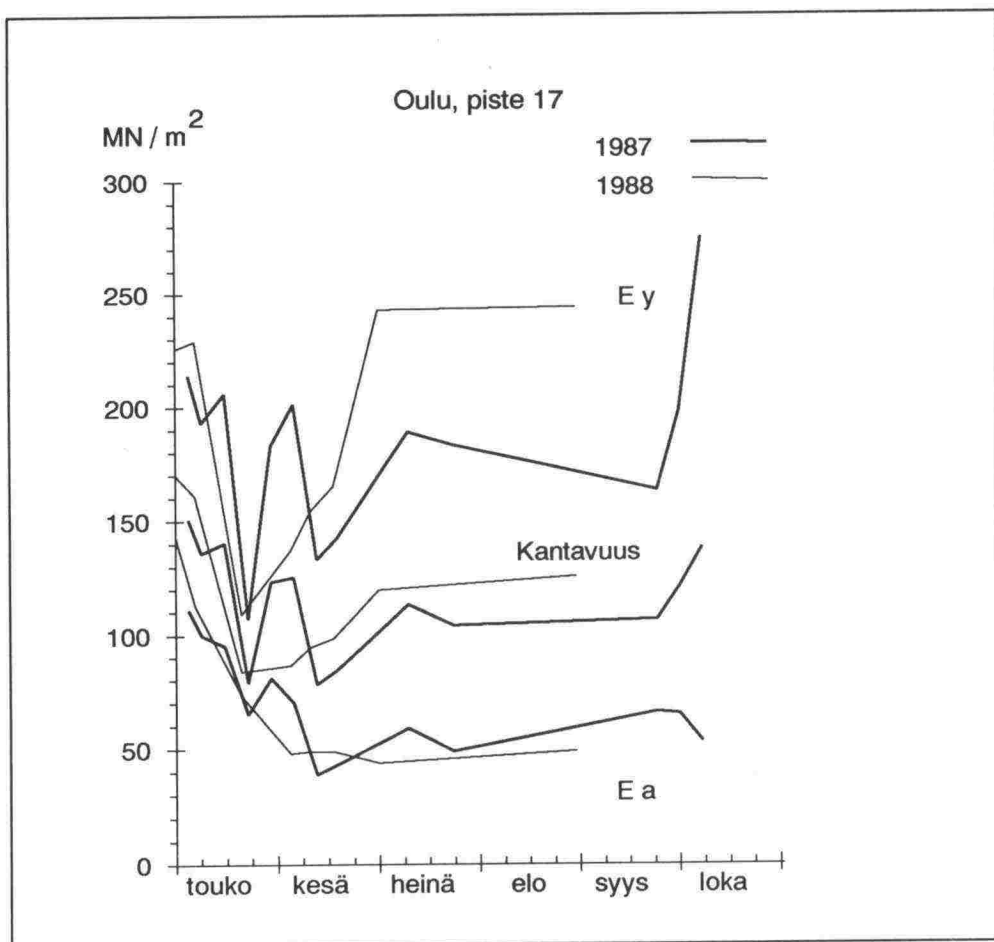
Kuva 59: Piste 20, Oulu. Rakennekerrosten materiaaliluokat ja paksuudet.



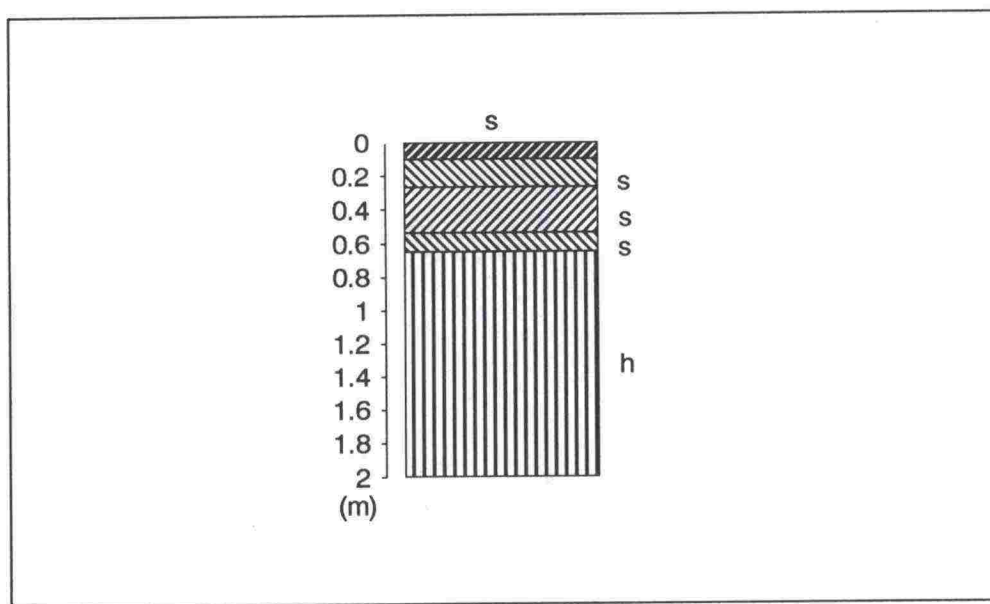
Kuva 60: Mitatut taipumasuppilot vuonna 1987. Piste 20, Oulu.



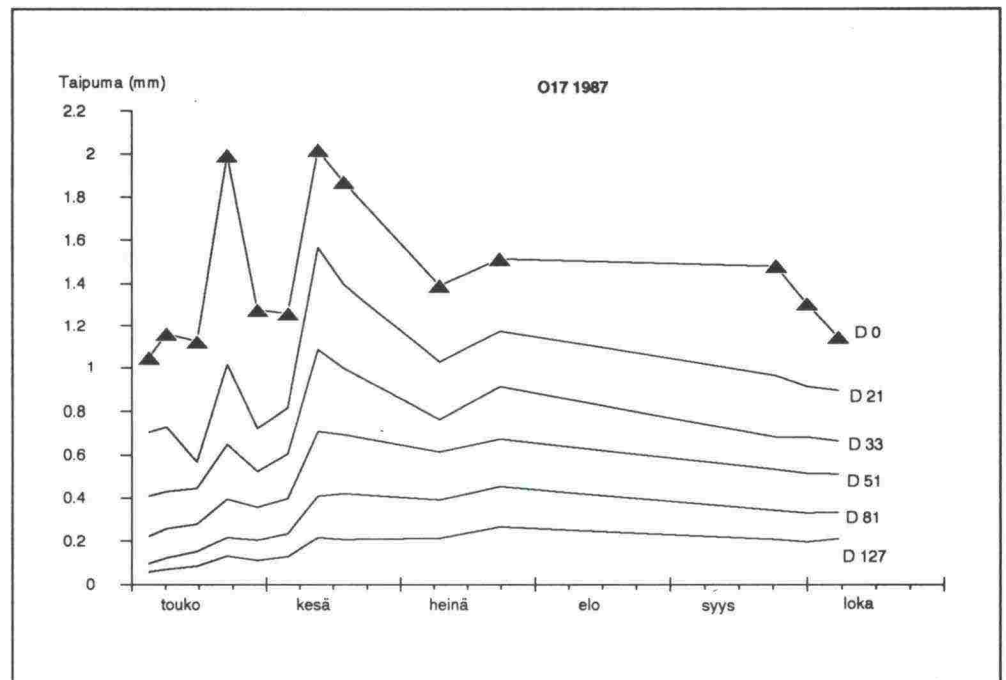
Kuva 61: Mitatut taipumasuppilot vuonna 1988. Piste 20, Oulu.



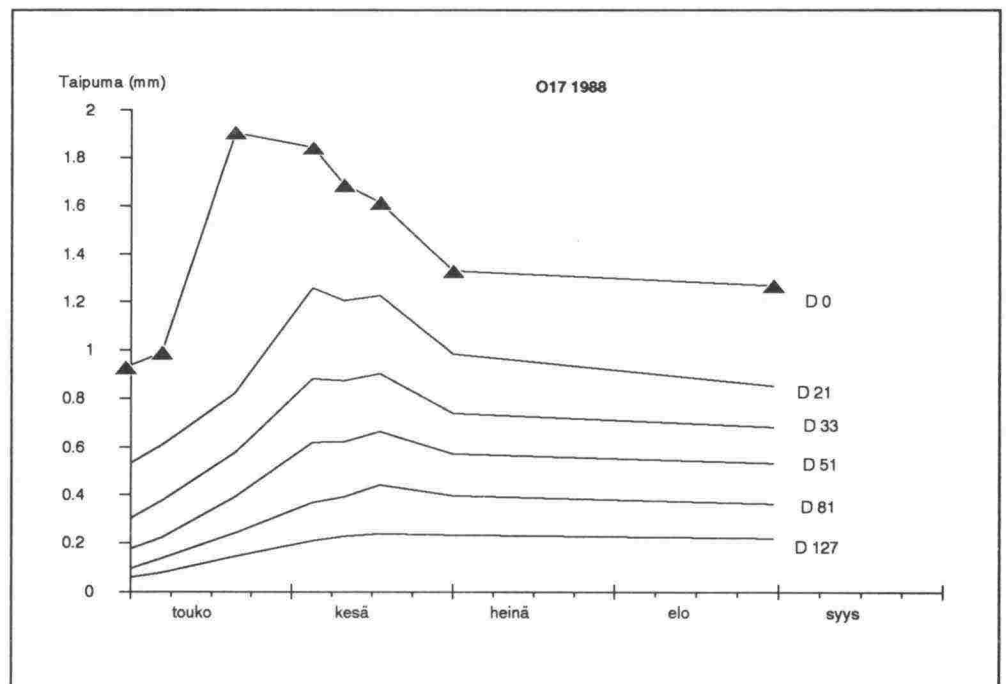
Kuva 62: Ylemmän ja alemman kerroksen E-moduulit ja kantavuus. Piste 17, Oulu.



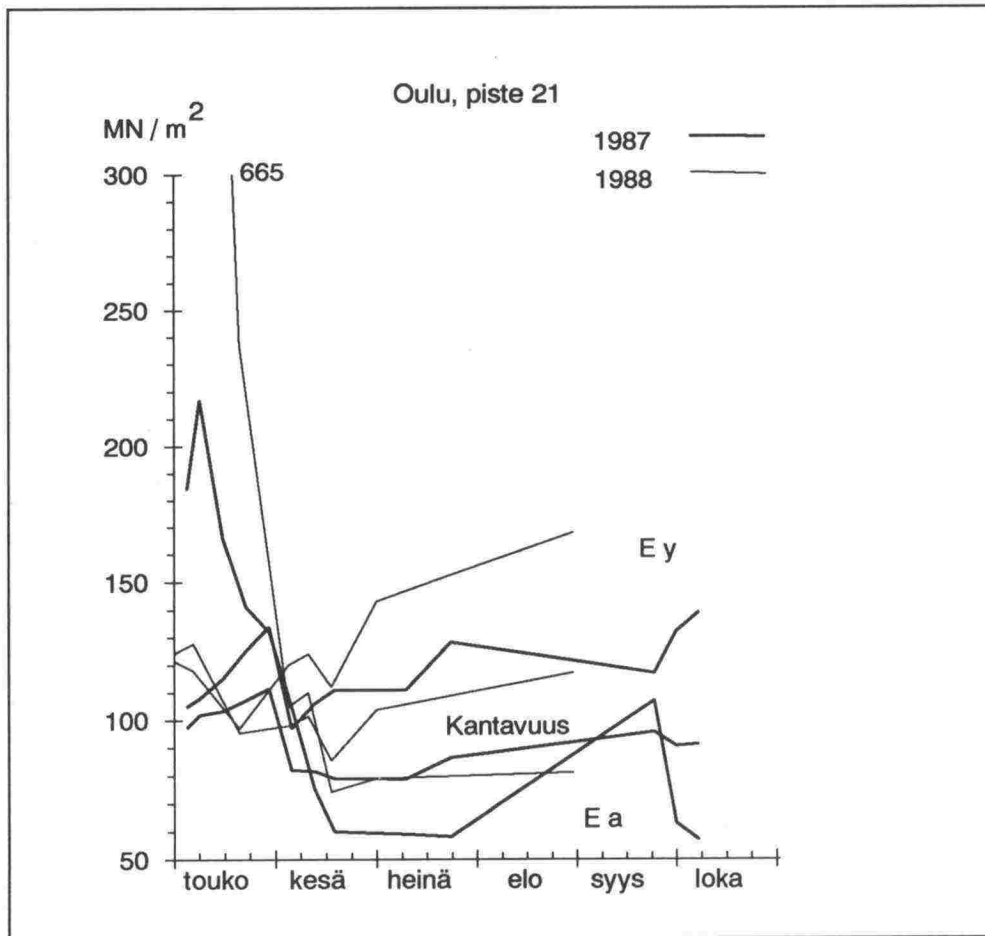
Kuva 63: Piste 17, Oulu. Rakennekerrosten materiaaliluokat ja paksuudet.



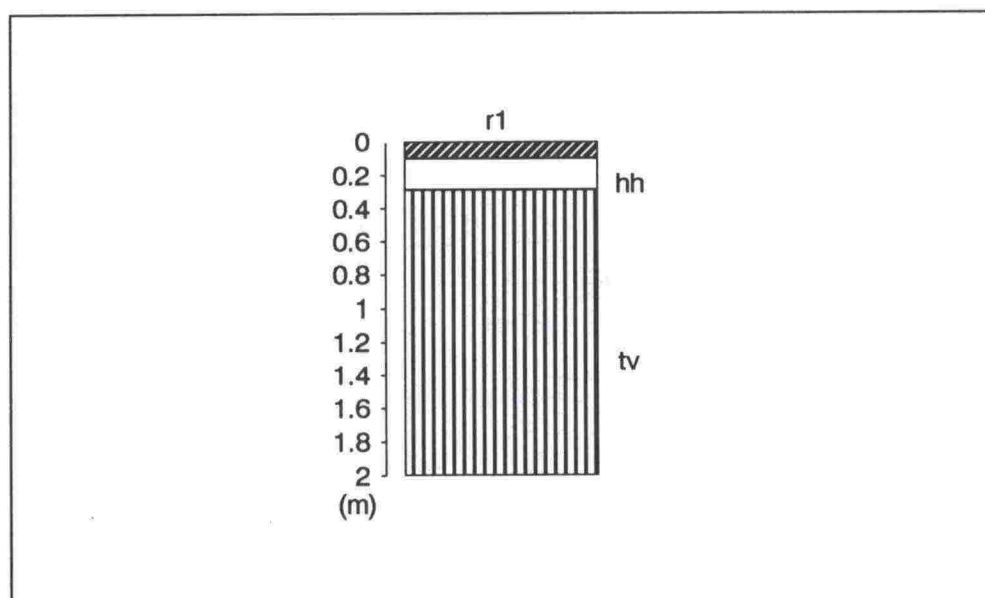
Kuva 64: Mitatut taipumasuppilot vuonna 1987. Piste 17, Oulu.



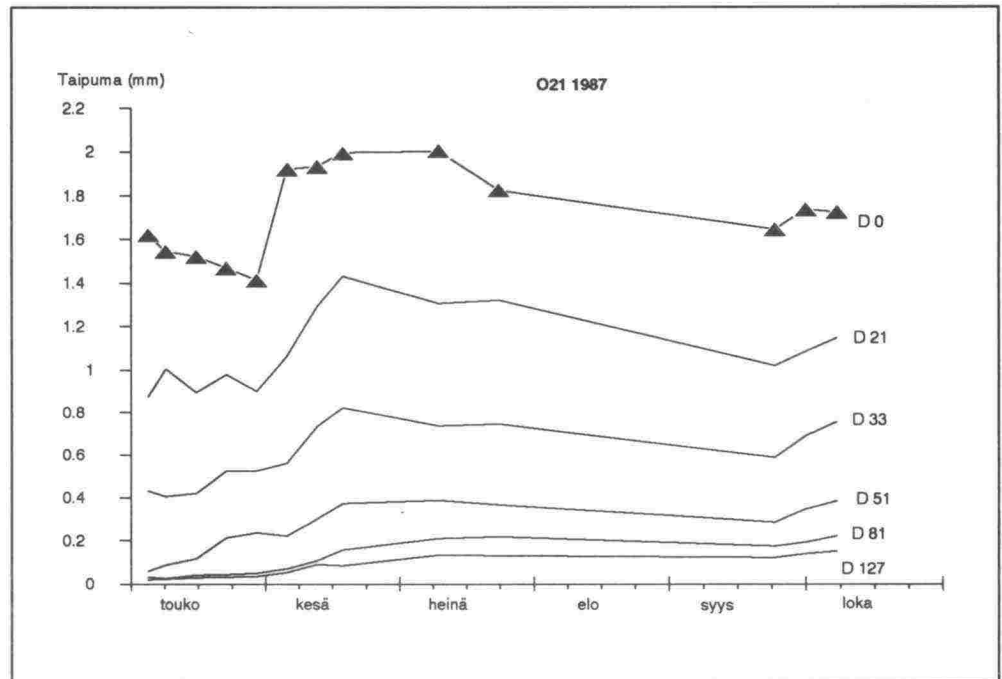
Kuva 65: Mitatut taipumasuppilot vuonna 1988. Piste 17, Oulu.



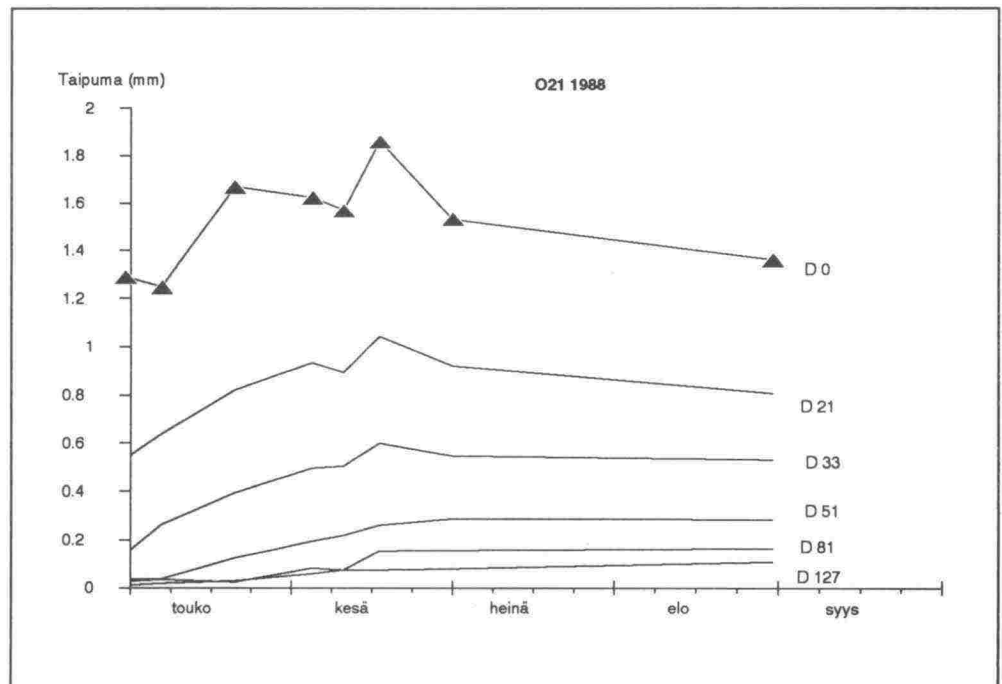
Kuva 66: Ylemmän ja alemman kerroksen E-moduulit ja kantavuus. Piste 21, Oulu.



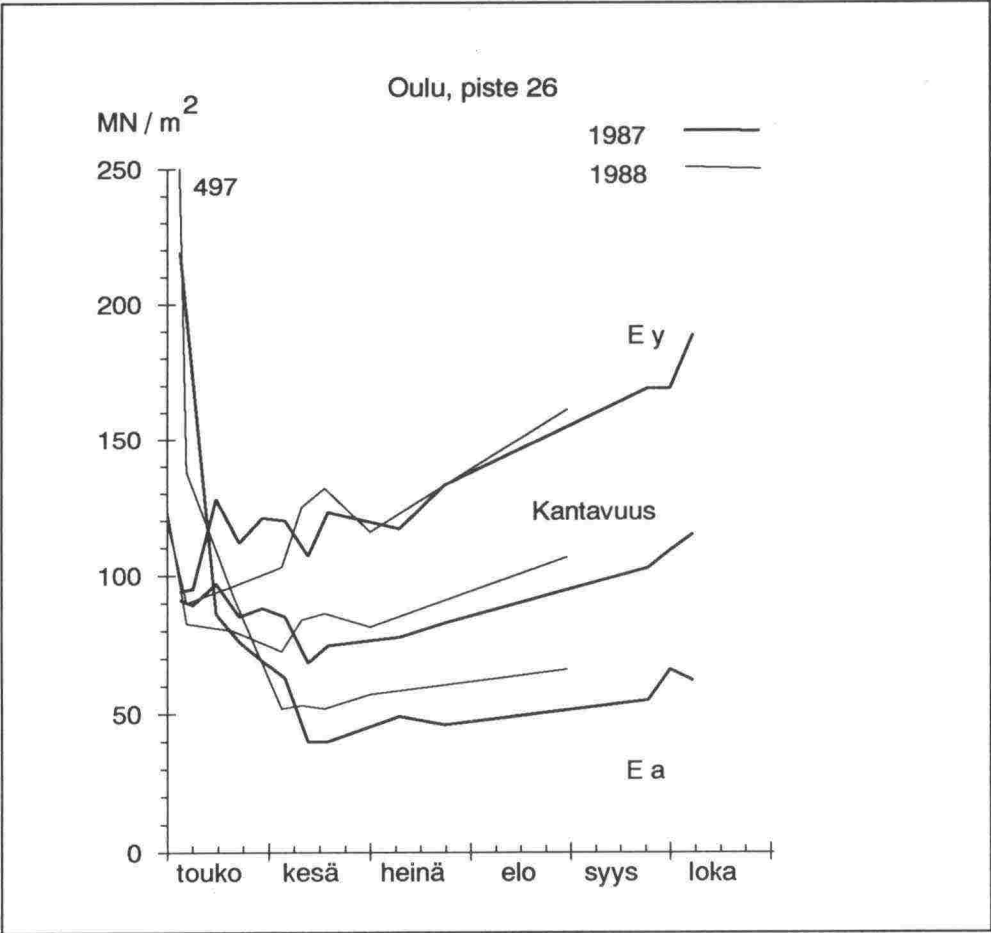
Kuva 67: Piste 21, Oulu. Rakennekerrosten materiaaliluokat ja paksuudet.



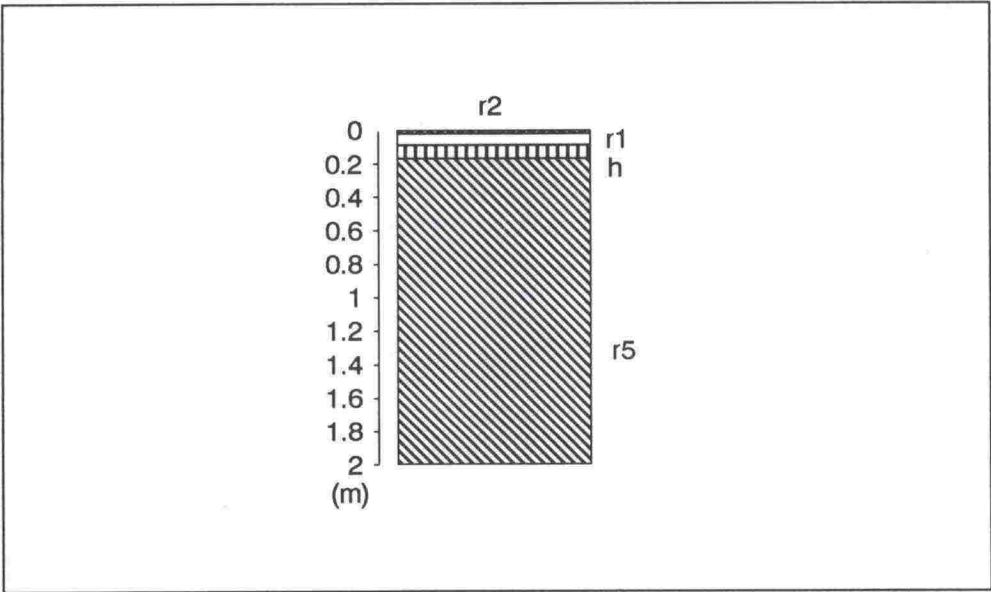
Kuva 68: Mitatut taipumasuppilot vuonna 1987. Piste 21, Oulu.



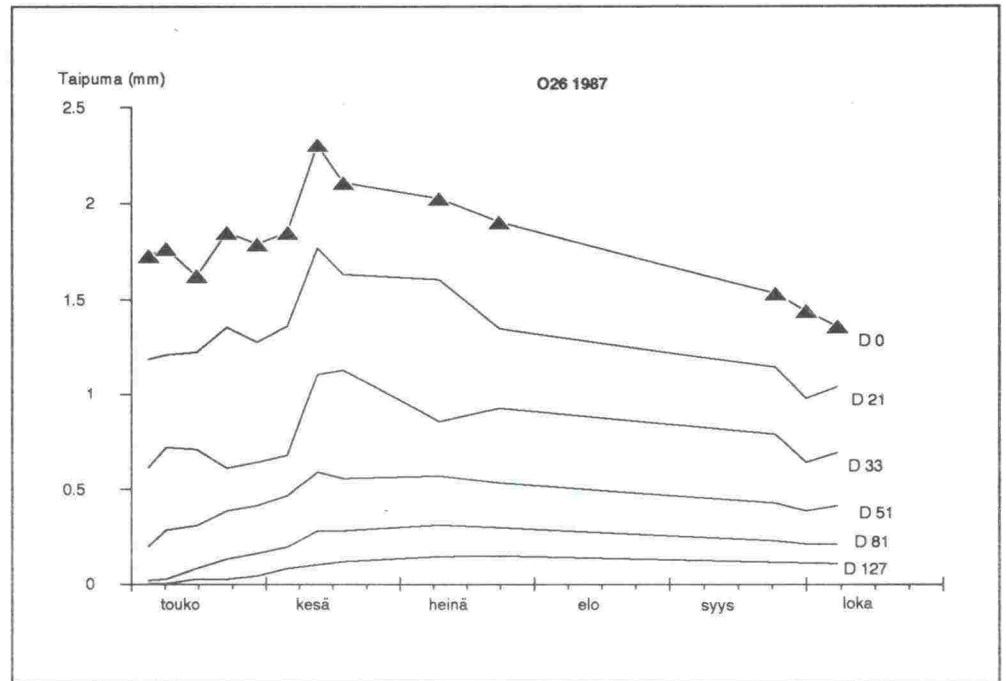
Kuva 69: Mitatut taipumasuppilot vuonna 1988. Piste 21, Oulu.



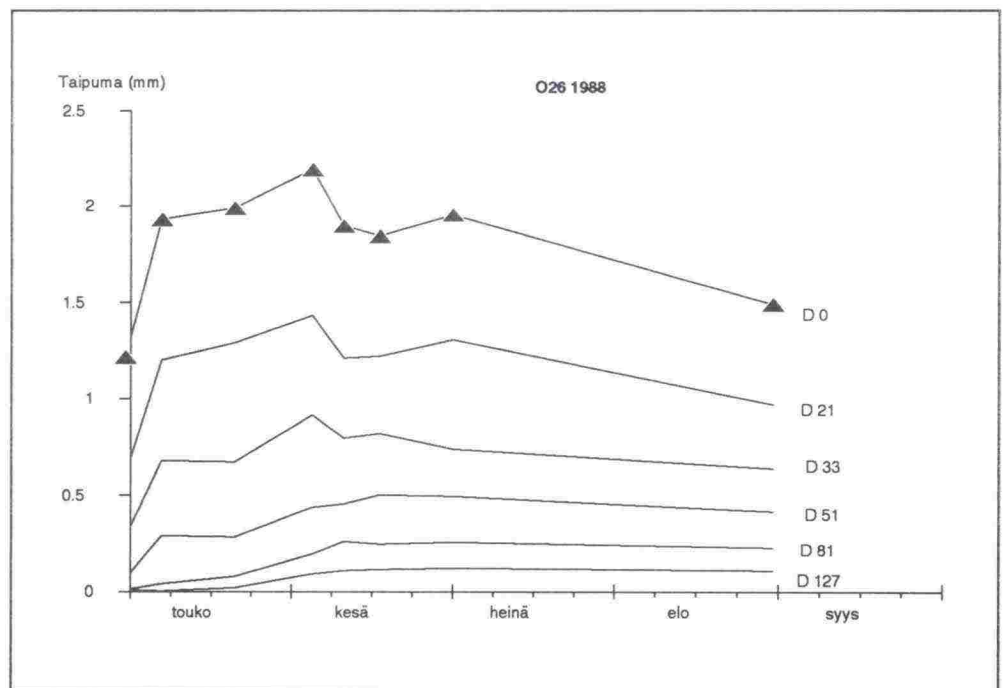
Kuva 70: Ylemmän ja alemman kerroksen E-moduulit ja kantavuus. Piste 26, Oulu.



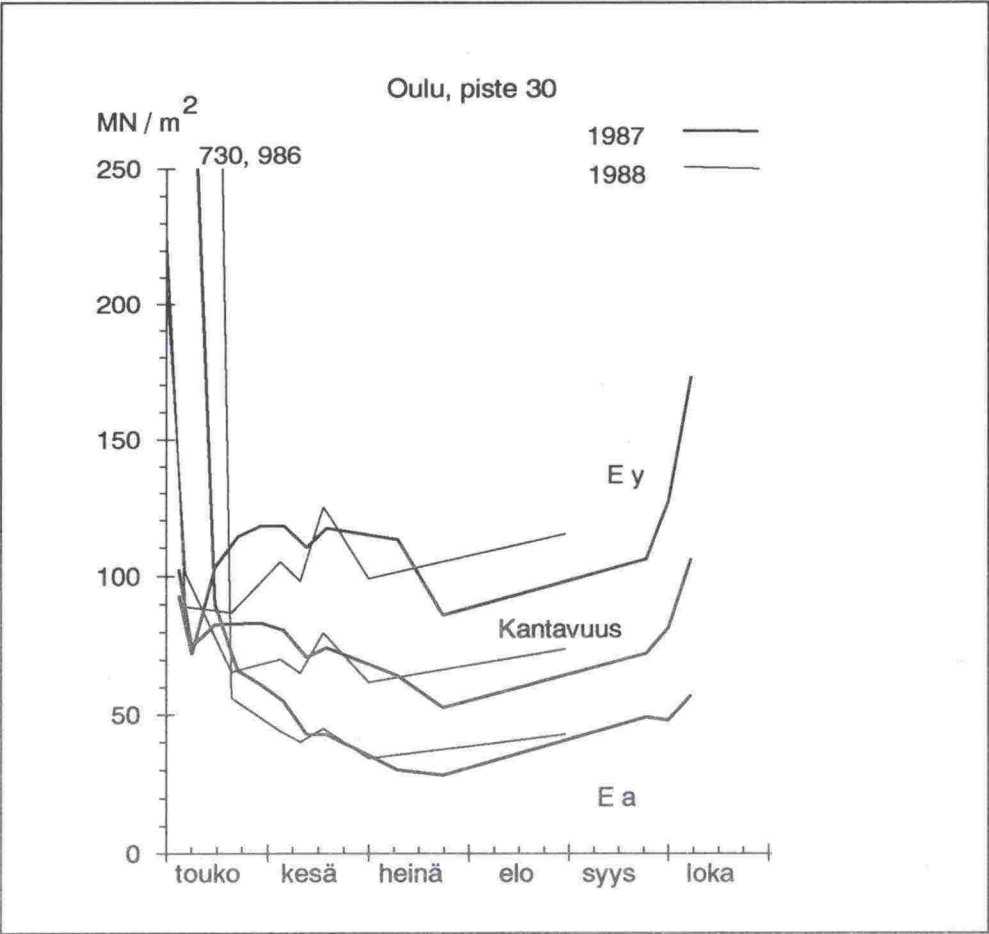
Kuva 71: Piste 26, Oulu. Rakennekerrosten materiaaliluokat ja paksuudet.



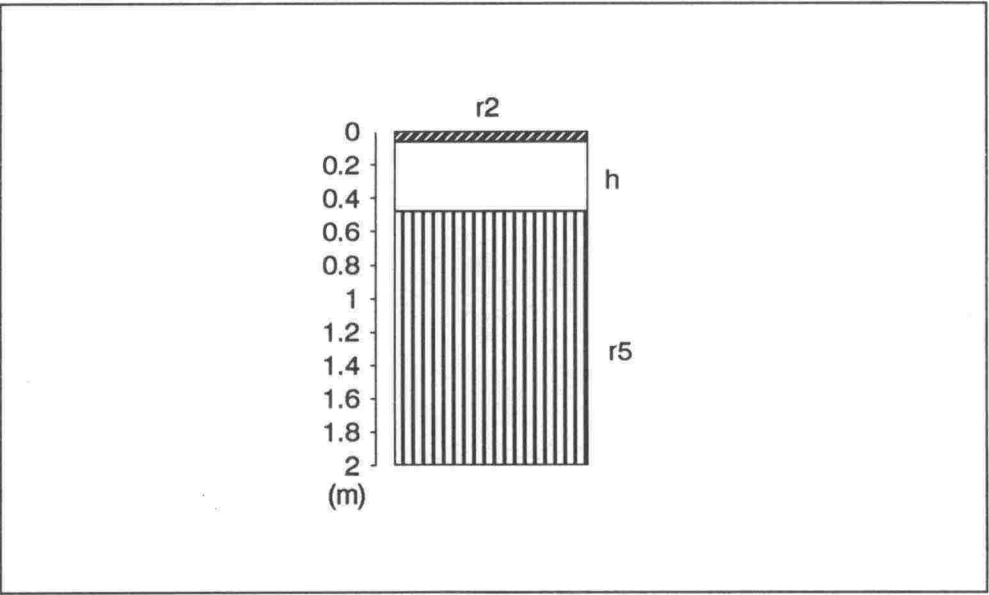
Kuva 72: Mitatut taipumasuppilot vuonna 1987. Piste 26, Oulu.



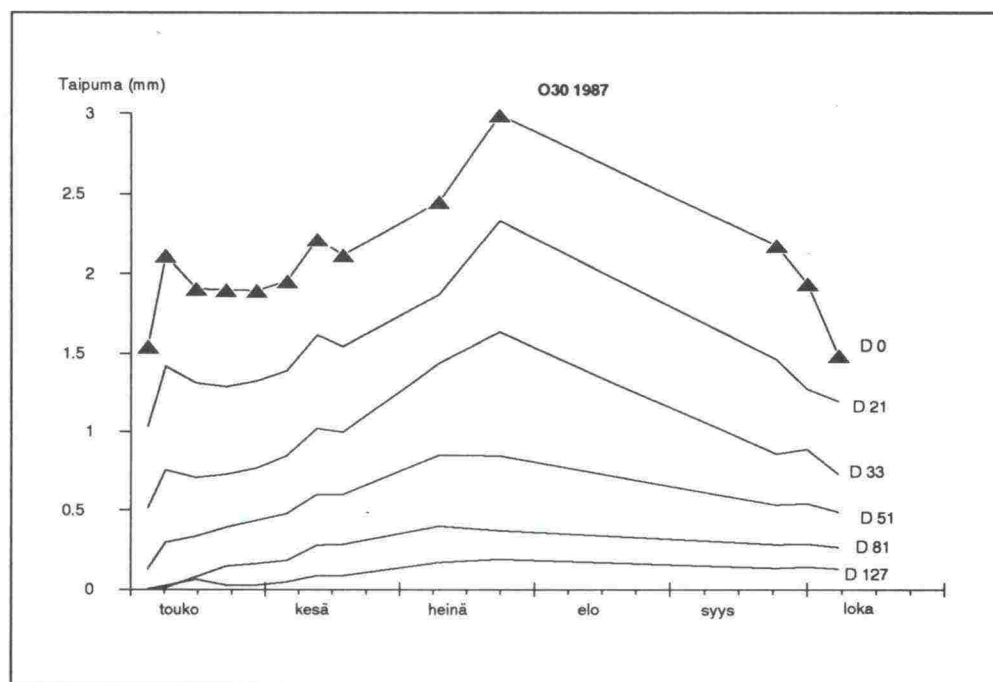
Kuva 73: Mitatut taipumasuppilot vuonna 1988. Piste 26, Oulu.



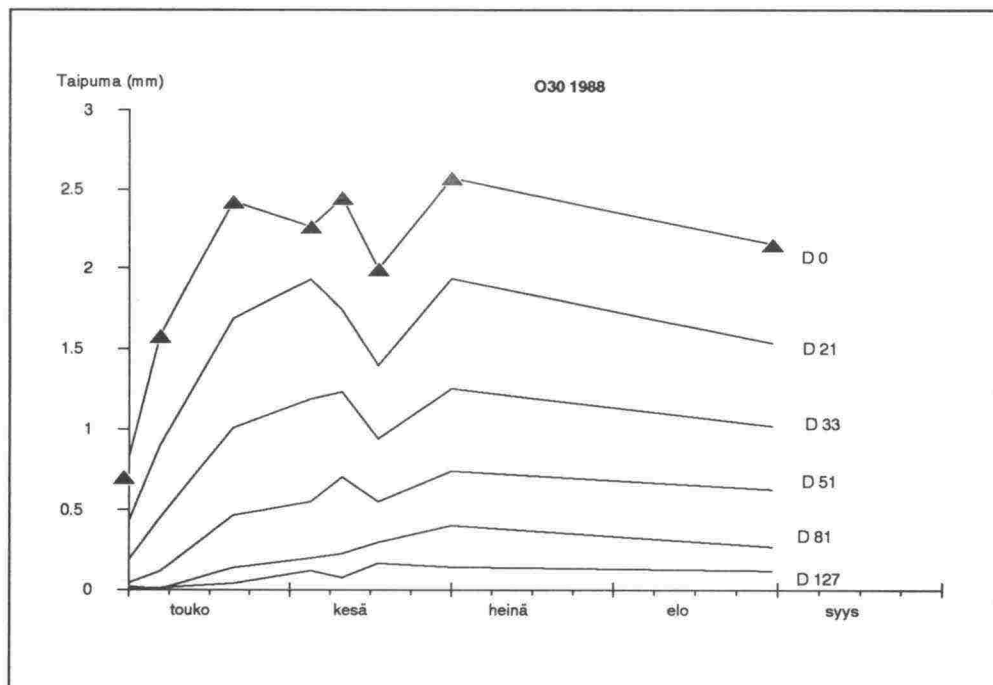
Kuva 74: Ylemmän ja alemman kerroksen E-moduulit ja kantavuus. Piste 30, Oulu.



Kuva 75: Piste 30, Oulu. Rakennekerrosten materiaaliluokat ja paksuudet.



Kuva 76: Mitatut taipumasuppilot vuonna 1987. Piste 30, Oulu.



Kuva 77: Mitatut taipumasuppilot vuonna 1988. Piste 30, Oulu.

Heikoin kantavuus mitattiin vuonna 1988 tavallisesti 1-3 vk aikaisemmin kuin vuonna 1987. Kantavuudet laskivat tai olivat alhaisella tasolla usein vielä kesäkuun alussa. Tien rakenteella, varsinkin alusrakenteen laadulla ja mahdollisesti myös

pohjavesisuhteilla paikallisina muuttujina, on suurempi vaikutus kevätkantavuuteen kuin tien maantieteellisellä sijainnilla (välillä Turku - Oulu).

Alemman kerroksen E-moduulille haettiin heikoimmat arvot ja kymmenen heikoimman mittauksen keskiarvot, jotka voivat olla eri pisteiden tai saman pisteen eriaikaisia mittaustuloksia. Tulokset on esitetty taulukossa 9. Ryhmittely tehtiin alusrakenteen ja rakennustavan mukaan. Aineisto käsitti kaikki pudotuspainolaitteella tehdyt mittaukset. Suurinta tai keskimääräistä E-moduulia ei voitu laskea, koska mittauksiin kuului myös jäätyneitä pohjamaita. E-arvojen ajallisesta vaihtelusta kertovatkin parhaiten edellä olleet kuvat. Koska laskenta tehtiin kaksikerrosrakenteena päällysrakenteen paksuudella 40 cm, taulukon "alusrakenne" voi joissakin tapauksissa sisältää myös suodatinhiekkää.

Taulukko 9: Alemman kerroksen arvioidut E-moduulit pudotuspainolaitteella määritettynä. Rtn tarkoittaa rakentamatonta, rtu rakennettua ja rp rakenteeltaan parannettua tietä.

Alusrakenne	Rakennetyyppi	10 pienimmän keskiarvo, MN/m ²	Pienin arvo, MN/m ²
Sa	rtn	11.8	8
kSi	rtn	13.7	11
mSi	rtn	18.5	15
kSa	rrp	24.3	9
Hk	rtu	29.3	25
mHkMr	rtn	33.3	29
mHkMr	rtu	36.6	31
kHkMr	rtn	36.7	32
kHkMr	rtu	38.3	28
Tv	rtn	38.7	28
Sa	rtu	51.5	44
Sa	krp	55.4	47
Hk	rtn	63.7	52
kSi	krp	66.3	56
mSi	krp	69.2	51

Jos tuloksia verrataan Tielaitoksen suunnitteluohjeisiin, saadut arvot ovat jonkin verran suurempia, varsinkin turpeella.

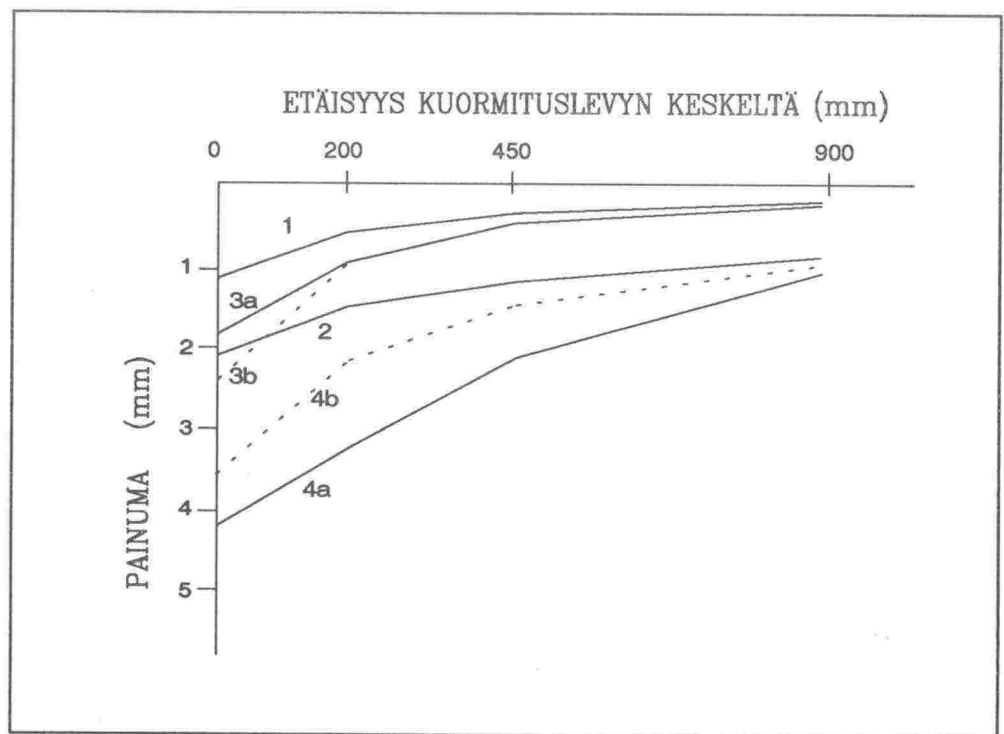
4.3.3. Taipumasuppiloiden hyödyntäminen tierakenteen parantamista suunniteltaessa

Seuraavassa esitetään esimerkki siitä, miten taipumasuppiloa voidaan käyttää hyväksi, kun valitaan parantamista vaativat kohteet. Tiet voidaan jakaa kunnostamistarpeen mukaan: (taulukko 10) /4/.

Taulukko 10: Esimerkin mukaiset rakenteet.

Tapaus	Päällys- rakenne	H (mm)	E1 (MPa)	Alus- rakenne	E2 (MPa)
1	hyvä	600	200	hyvä	80
2	hyvä	600	200	huono	15
3a	huono	100	200	hyvä	80
3b	huono	600	80	hyvä	80
4a	huono	200	200	huono	15
4b	huono	600	80	huono	15

Lasketaan kullekin tapaukselle teoreettinen taipuma, joka käytännössä olisi mitattu taipumasuppilo. Kun kuormituksena on 50 kN ja kosketuspaineena 0,7 MPa, saadaan Chevron-ohjelmalla seuraavat taipumat: (kuva 78)



Kuva 78: Laskettu taipumasuppilo esimerkin tapauksille /4/

Edellä olevat tapaukset voidaan erottaa toisistaan seuraavalla kaaviolla (taulukko 11) /4/:

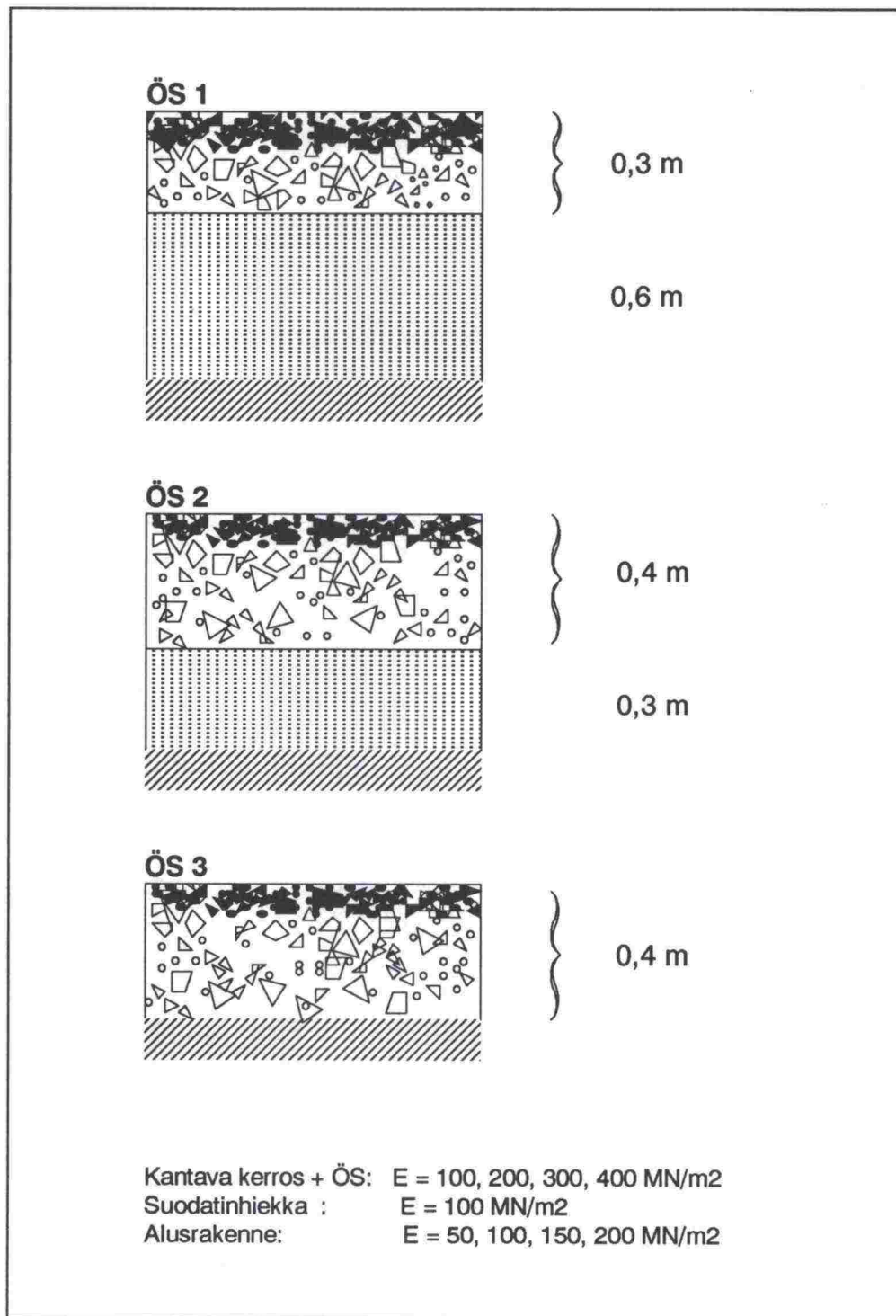
Taulukko 11: Esimerkin lasketut tunnusluvut

Tapaus	D(0)	D(r)	D(0) - D(r)
1	pieni	pieni	pieni
2	suuri	suuri	pieni
3	suuri	pieni	suuri
4	suuri	suuri	suuri

Tässä D(0) tarkoittaa kuormituslevyn keskeltä mitattua taipumaa ja D(r) päällysrakennetta kuvaavalta etäisyydeltä mitattua taipumaa (etäisyys vastaa päällysrakenteen ekvivalenttipaksuutta). Kun kriteerinä on sidottujen kerrosten kestävyys, tunnusluvuista valitaan kaarevuussädettä kuvaava D(0) - D(r). Tässä esimerkissä vain tapaukset 3 ja 4 vaativat vahvistustoimenpiteitä. Todellinen hyvän ja huonon rakenteen raja voidaan tietenkin valita erilaiseksi /4/.

Tunnuslukujen teoreettista merkitystä tutkittiin sora-, öljysora- ja asfalttirakenteilla, joista esimerkkinä ovat kuvan 79 öljysorarakenteet. ÖS1 kuvaa öljysoratietä, jolla on paksu päällysrakenne, ÖS2 on välimuoto ja ÖS3 kuvaa rakentamatonta öljysoratietä. Yhdistetylle päällysteen ja kantavan kerroksen E-moduulille käytettiin arvoja: 100, 200, 300 ja 400 MN/m². Alusrakenteen E-moduuli oli 50, 100, 150 ja 200 MN/m² sekä eristyshiekan 100 MN/m² (rakenteissa ÖS1 ja ÖS2). Kullekin rakenteiden E-moduulien yhdistelmälle laskettiin teoreettinen kuormituskertaluku. Jännitykset laskettiin Ecoroute-ohjelmalla. Kuormituksena käytettiin paripyörää (2 · 25 kN) ja kosketuspaineena 722 kN/m². Sitomattomien kerrosten E-moduulin ylärajana (E₂) käytettiin alemman kerroksen E-moduulista (E₁) ja kerroksen omasta paksuudesta (h) riippuvaa arvoa seuraavan kaavan mukaan:

$$E_2 = 0.2 \cdot h^{0.45} \cdot E_1 \quad (21)$$



Kuva 79: Taipumasuppiolon tunnuslukujen tutkimuksessa käytettyjä mallirakenteita

Sitomattomien kerrosten ja alusrakenteen kuormituskestävyys laskettiin tanskalaisella kaavalla:

$$\begin{aligned} n &= 1000 \cdot \sigma^{-3.26} \cdot (E / 160)^{3.78}, \text{ kun } E \leq 160 \text{ MN/m}^2 \\ n &= 1000 \cdot \sigma^{-3.26} \cdot (E / 160)^{3.26}, \text{ kun } E > 160 \text{ MN/m}^2 \end{aligned} \quad (22)$$

missä n on sallittu kuormituskertaluku
 σ on kerroksen yläpinnan pystysuora puristusjännitys
 E on kerroksen kimmomoduuli

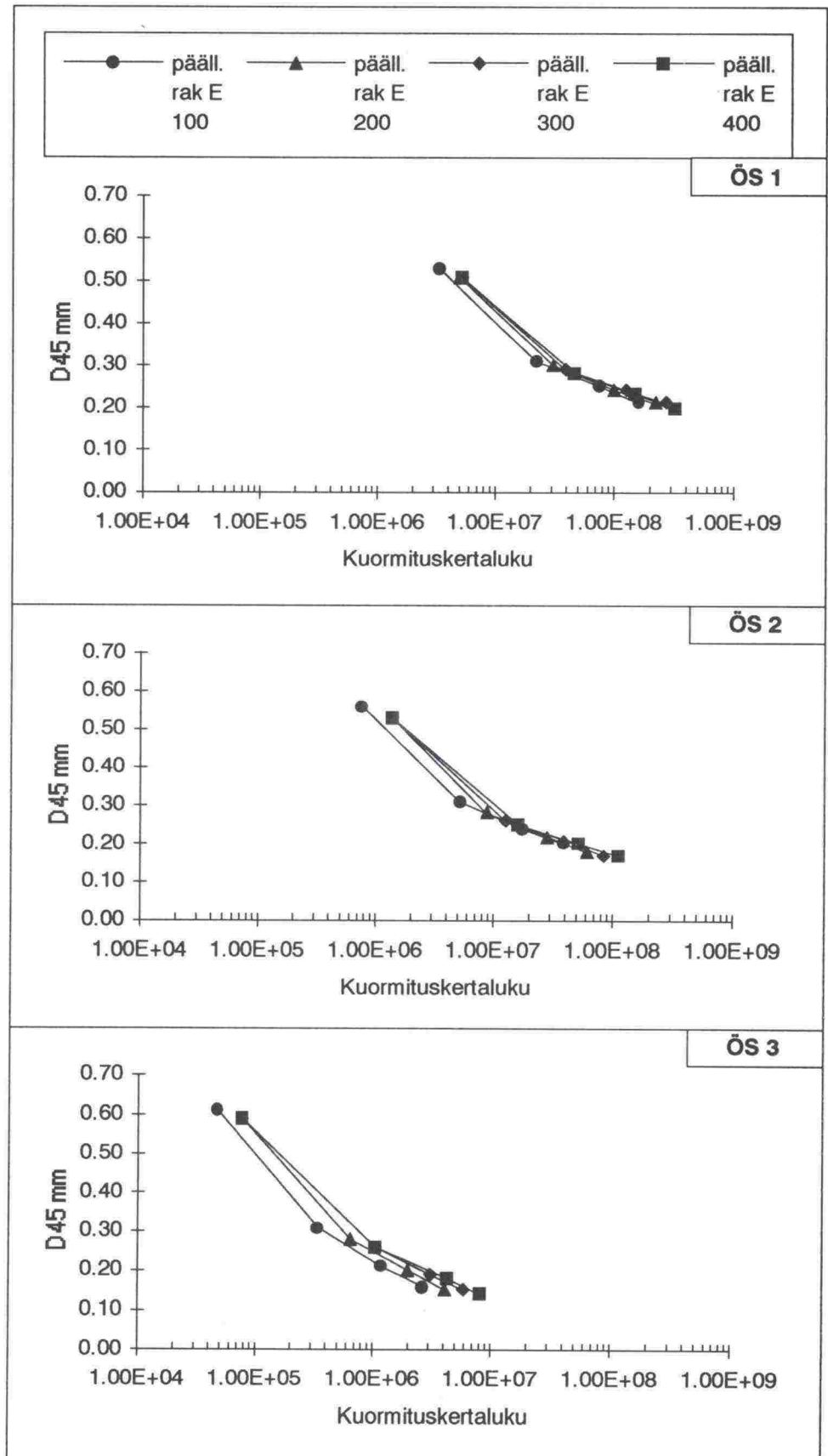
Käytetty kaava on tarkoitettu AB-teiden sitomattomille kerroksille, eikä se välttämättä ole hyvä ÖS-rakenteilla käytettynä. Kaavan avulla saadaan kuitenkin käsitys rakenteen kestävydestä. Koska E-moduulien vuodenaikavaihtelua ei ole otettu huomioon, saadut kestoiät ovat vain suhteellisia.

Taipumasuppilot eli teoreettiset tienpinnan taipumat laskettiin Pas 1 -tietokone-ohjelmalla. Suppiloa laskettaessa kuormituslevyn säde oli 15 cm ja kuorma 50 kN. Etäisyyksinä käytettiin arvoja: 0, 20, 45, 90 ja 127 cm. Tutkitut tunnusluvut olivat kunkin etäisyyden taipumat, niiden suhde kuormituksen keskikohdan taipumaan sekä keskikohdan taipuman ja etäistaipumien erotukset.

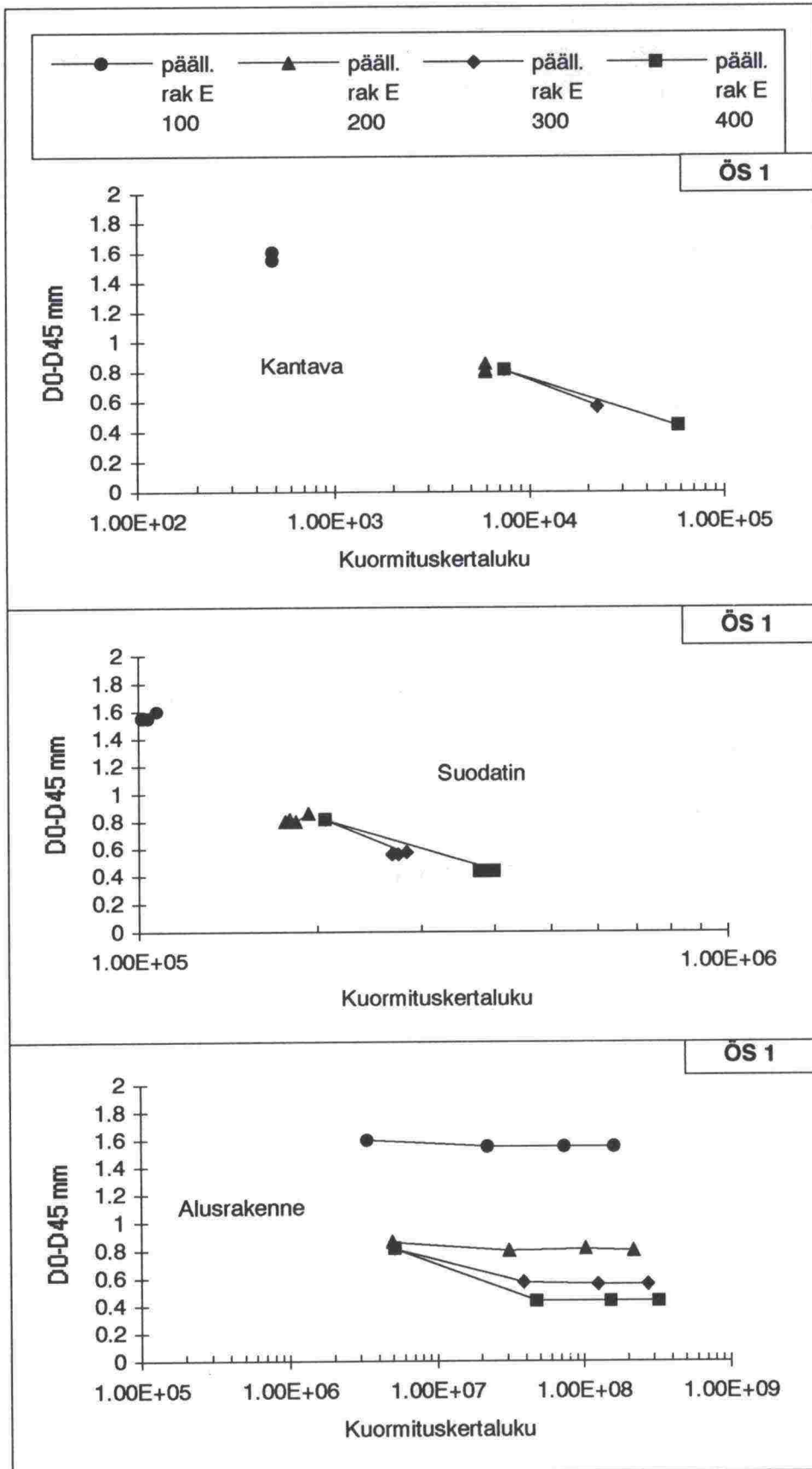
Käyttökelpoisimmat taipumasuppilon tunnusluvut rakentamisen parantamista suunniteltaessa ovat D(45) eli Kuab-laitteen kolmannen geofonin lukema sellaisenaan ja D(0) - D(45) eli edellinen vähennettynä kuormituslevyn keskipisteen painumasta. D(45) kuvaa hyvin alusrakenteen kestävyyttä (kuva 80). Erityyppisillä rakenteilla D(45):n lukuarvot poikkeavat toisistaan, mikä johtuu lähinnä eri päällysrakennepaksuuksista. D(0) - D(45) kuvaa päällysrakenteen yläosan ominaisuuksia yleensä hieman paremmin kuin D(0) (kuvat 81 ja 82; huomaa eri asteikko y-akselilla).

Kuvat on piirretty siten, että murtoviivalla on yhdistetty aina samaa päällysrakenne-moduulia (kantava kerros + ÖS) edustavat pisteet. Pisteet kullakin murtoviivalla (vasemmalta oikealle) ovat alusrakenteen E-moduuleja järjestyksessä pienimmästä suurimpaan. Ylemmän kerroksen E-moduulin rajoittaminen aiheuttaa sen, että eri päällysrakenteita kuvaavat viivat voivat osittain yhtyä. Tunnusluvun hyvyys päätellään pisteiden sijoittumisesta (paras tapaus olisi sellainen, jossa pisteet muodostaisivat kapean ja laskevan kaistaleen).

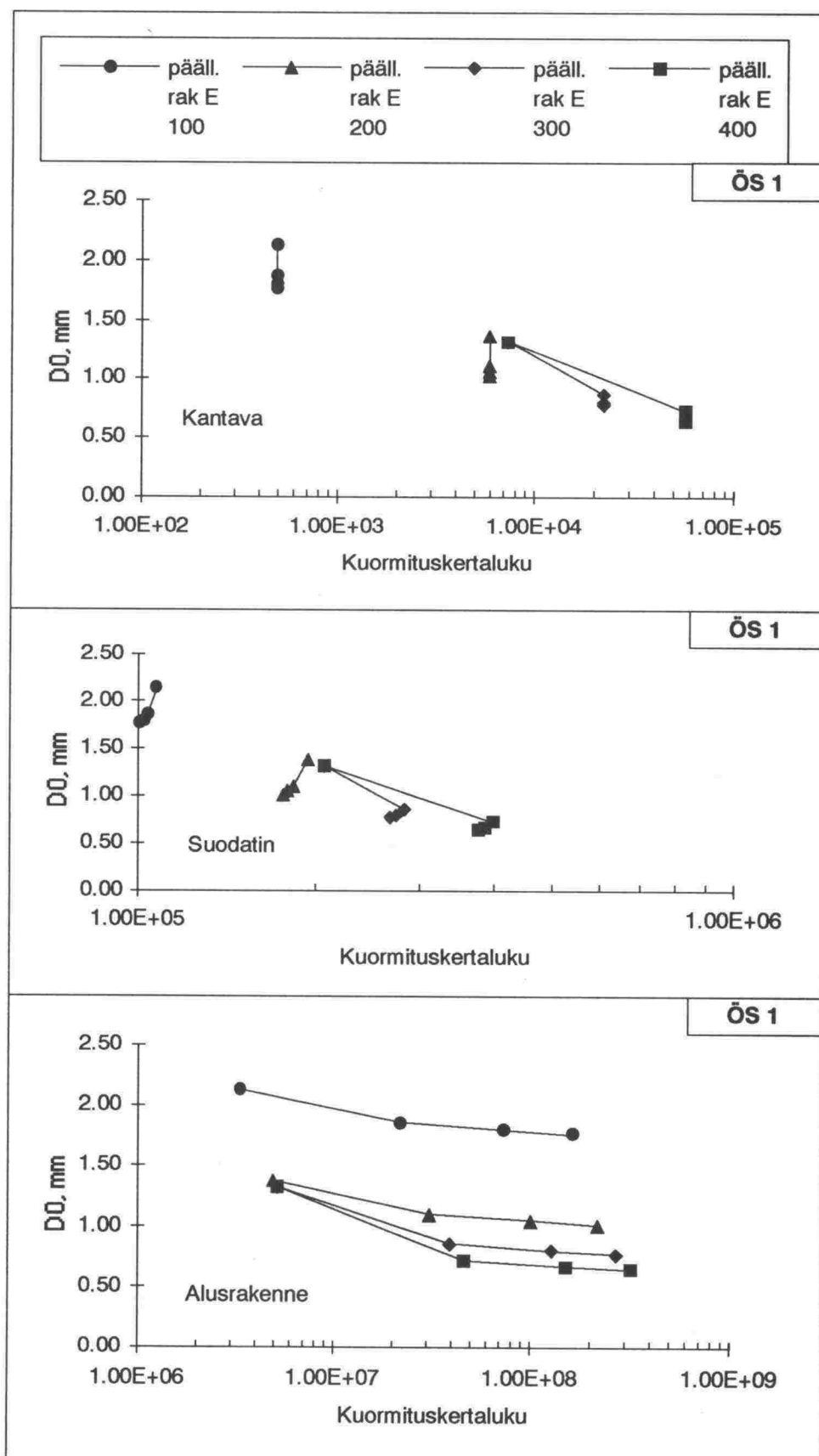
Kuvista voidaan myös päätellä, missä suhteessa alusrakenteen ja kantavan kerroksen E-moduulit vaikuttavat tunnusluvun kuvaamaan rakennekerroksen kestävyteen. Kun viivat ovat lähes vaakasuorassa, alusrakenne vaikuttaa kuormituskertalukuun kantavaa kerrosta selvästi enemmän.



Kuva 80: D 45 kuvaa alusrakenteen kestävyyttä.



Kuva 81: D 0 - D 45 kuvaa päällysrakenteen yläosan ominaisuuksia.



Kuva 82: D 0 kuvaa kantavaa kerrosta vähän huonommin kuin D 0 - D 45.

4.4. Laskennalliset ja mitatut kantavuudet

4.4.1. Yleistä

Suunnittelua varten tarvitaan menetelmä, jolla materiaalitietoihin perustuen voidaan laskea rakenteen kuormituskestävyys. Alusrakenteen kantavuus voidaan arvioida pudotuspainolaitteen taipumasuppilosta aiemmin kuvatulla tavalla. Toinen tapa, jota nyt käytetään, perustuu iterointiin: Lasketaan kantavuuskaavalla, mikä alusrakenteen E-moduuli yhdessä annettujen kerrosmoduulien ja -paksuuksien kanssa antaa tulokseksi mitatun kantavuuden.

4.4.2. Tielaitoksen käyttämällä menetelmällä lasketut alusrakenteen E-moduulit

Valittujen sadanyhdentoista pisteen alusrakenteen kantavuuksiksi saatiin kevätkantavuudesta ja oletetuista kolmen eri vaihtoehdon (kuiva, keskimääräinen ja märkä tila) kerrosmoduuleista laskemalla taulukon 12 tulokset. Valittuihin pisteisiin ei kuulunut yhtään luokkaa r3 eikä r2 olevaa alusrakennetta. Ylisuuret alusrakenteen kantavuusarvot on hylätty.

Taulukko 12: Alusrakenteelle luokittain (luokitus kuvan 18 mukaan, sivu 44) lasketut E-moduulin keskiarvot ja keskihajonnat MN/m². Tässä nhyv on hyväksyttyjen koepisteiden määrä ja nhyl tarkoittaa pisteitä, joissa päällysrakenne oletettiin liian heikoksi. (Eri vaihtoehdoille annetut E-moduulin arvot ovat taulukossa 4)

Vaihtoehto 1	Luokka	k.arvo	k.haj.	nhyv.	nhyl.	nyht.
	r5	24	1,4	62	9	71
	r4	171	244	10	4	14
	r1	25	24	2	-	2
	h	40	18	4	2	6
	hh	145	11	4	3	7
	s	298	334	2	-	2
Vaihtoehto 2	Luokka	k.arvo	k.haj.	nhyv.	nhyl.	nyht.
	r5	48	2,1	49	22	71
	r4	153	187	11	3	14
	r1	25	25	3	-	2
	h	40	18	4	2	6
	hh	80	11	4	3	7
	s	137	107	2	-	2
Vaihtoehto 3	Luokka	k.arvo	k.haj.	nhyv.	nhyl.	nyht.
	r5	48	0,7	48	23	71
	r4	111	42	13	1	14
	r1	22	21	3	-	3
	h	30	24	4	2	6
	hh	65	4,9	4	3	7
	s	118	87	2	-	2

Suurin osa alusrakenteista oli savea, savimoreenia, silttiä tai silttimoreenia (r5). Seuraavaan luokkaan (r4), joka sisälsi vähemmän hienoaainesta, kuuluu hiekka ja hiekkamoreeni. Karkeampien maalajien osuus oli niin pieni, että niille lasketuilla E-

moduuleilla ei ole tilastollista merkitystä. Koska mitatut kantavuudet olivat heikoimpia eli kevätkantavuuksia, voidaan olettaa vaihtoehdon 1 parhaiten kuvaavan teiden kosteustilaa. Myös hylättyjen määrä oli VE 1:lla pienempi kuin muilla vaihtoehdoilla laskettaessa. Näin määritettyinä luokkien r5 ja r4 kantavuudet ovat suurempia kuin niille Tielaitoksen suunnitteluohjeissa annetut kantavuudet. Luokan r4 keskihajonta oli pienin VE 3:lla, mikä viittaa siihen, että alusrakenteen maalajin ollessa karkeaa kantava kerros on myös keväällä suhteellisen kuiva. Suurimmat erot eri vaihtoehtojen kerrosmoduuleissa olivat juuri kantavan ja jakavan kerroksen materiaaliluokilla s ja r1.

4.4.3. Mitatut ja Tielaitoksen käyttämällä menetelmällä lasketut kantavuudet

Toinen osa tarkastelua oli verrata, miten suunnitteluohjeen avulla lasketut kantavuudet suhtautuvat mitattuihin kevätkantavuuksiin. Kerrosmoduulit on laskettu vaihtoehto 2:n mukaan (taulukko 4 sivulla 44). Alusrakenteen kantavuutena on käytetty ensin suunnitteluohjeen arvoa sellaisenaan, sen jälkeen ohjearvoa kaksinkertaisena ja kahdella jaettuna. Tulosten täydellinen listaus on liitteessä 4. Seuraavissa kuvissa (kuvat 83 - 98) mitattujen ja laskettujen kantavuuksien suhde on esitetty maalajeittain. Alusrakenteen kantavuudelle annettu ohjearvo on mainittu kuvatekstissä. Tärkeää on, että kantavuutta ei yliarvioitaisi. Pisteiden kuvissa olisi siis pysyttävä katkoviivan alapuolella ja mieluummin hyvin lähellä sitä.

Päällysrakenteet jaettiin ohuisiin ja paksuihin rajan kulkiessa 0,7 metrissä. Päällysrakenteen paksuus vaikuttaa selvästi mitattujen ja laskennallisten kantavuuksien suhteeseen. Kuvissa tummat merkit kuvaavat pisteitä, joissa päällysrakenne on ohut.

Kun alusrakenne on hiekkaa, ohuet päällysrakenteet ovat kevätkantavuudeltaan parempia, kuin niille laskemalla saatavat arvot. Paksuilla päällysrakenteilla kantavuus tulee puolestaan yliarvioituksi. Eniten poikkeavat hiekka-alusrakennetta kuvaavat pisteet ovat AB-tieltä, minkä takia alusrakenteen kantavuusarvon puolittaminenkaan ei juuri paranna tilannetta.

Saven osalta mitatut ja laskennalliset kantavuudet ovat yleensä lähellä toisiaan ja lasketut kantavuudet enimmäkseen turvallisella puolella. Alusrakenteen kantavuuden puolitus siirtää joitakin pisteitä viivan alle, mutta ei merkittävästi.

Kuivalla savella mitattu kevätkantavuus on selvästi laskennallista kantavuutta heikompi. Puolta pienempää alusrakenteen kantavuutta (eli saven kantavuutta) käytettäessä arvojen vastaavuus paranee.

Kuivan siltin ohjearvolla lasketut kantavuudet ovat lähellä mitattuja arvoja. Lievät ylitykset korjaantuvat ohjearvon puolittamisella, mutta viivan alla on jo ohjearvolla laskettaessa melko kaukaisia pisteitä, mikä jo johtaa selvään ylimitoitukseen.

Märälle siltille ohjearvo on liian pieni. Vielä kaksinkertaisellakin alusrakenteen kantavuudella saadut laskennalliset kantavuusarvot ovat paljon mitattuja kevätkantavuuksia alhaisempia.

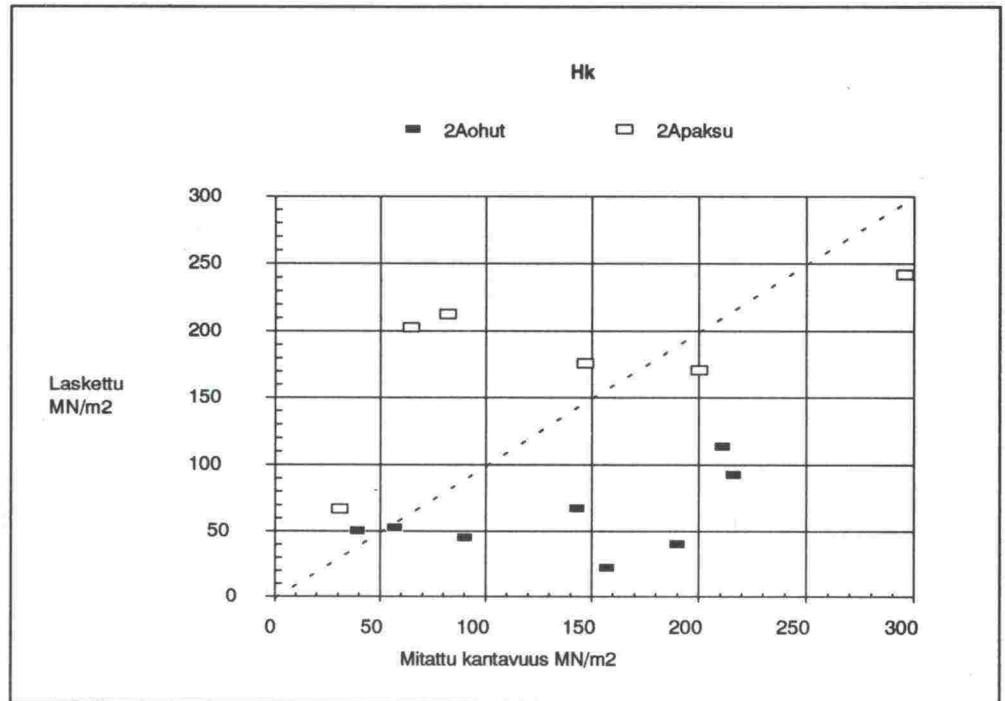
Kuivan hiekkamoreenin ohjeen mukainen kantavuusarvo osoittautui ohuiden päällysrakenteiden laskemisessa usein liian optimistiseksi. Ohjearvon puolitus korjasi laskentaa hyvin.

Märkä hiekkamoreeninen alusrakenne ohjearvolla laskettuna sopi muutamaa pistettä lukuunottamatta neutraaliviivan alapuolelle. Ohjearvon puolittaminen johtaisi ohuiden päällysrakenteiden tapauksessa voimakkaaseen ylimitoitukseen.

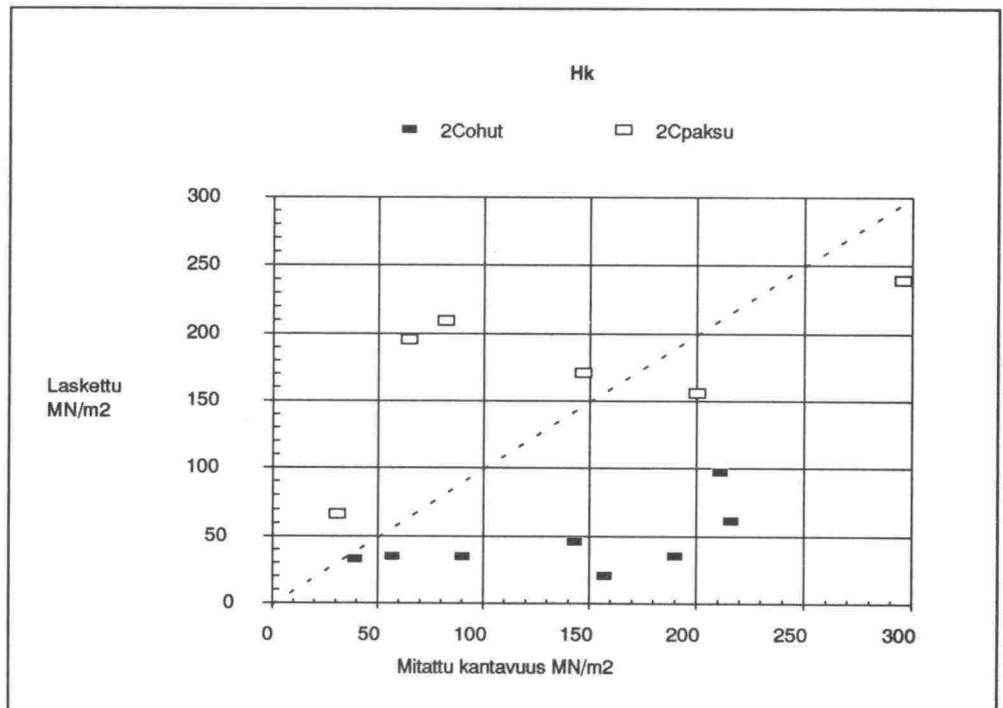
Turvetta kuvaava ohjeen mukainen kantavuusarvo on ohuilla päällysrakenteilla laskettaessa turvallisella puolella, mutta paksut rakenteet lasketaan todellista kevätkantavuutta paremmiksi. Kaikki kuvan tummat pisteet ovat sorateiltä ja avoimet pisteet ÖS-tieltä, niistä kauimmaisessa laskentaan vaikuttaa tietä rakennettaessa kantavaan kerrokseen jätetty vanha öljysorakerros.

Mitattuna kantavuutena käytettiin kevätkantavuutta. Ajankohtana, jolloin routa on juuri sulanut, samaa maalajia olevan alusrakenteen "kuiva" ei ehkä erotu "märästä" kovinkaan selvästi. Kuivaksi saveksi luokitellulle maalajille sopi sama (alempi) kantavuus, kuin savelle, jota ei katsottu kuivaksi. Toisaalta märkä siltti voitiin laskea samalla (suuremmalla) arvolla, kuin kuiva siltti.

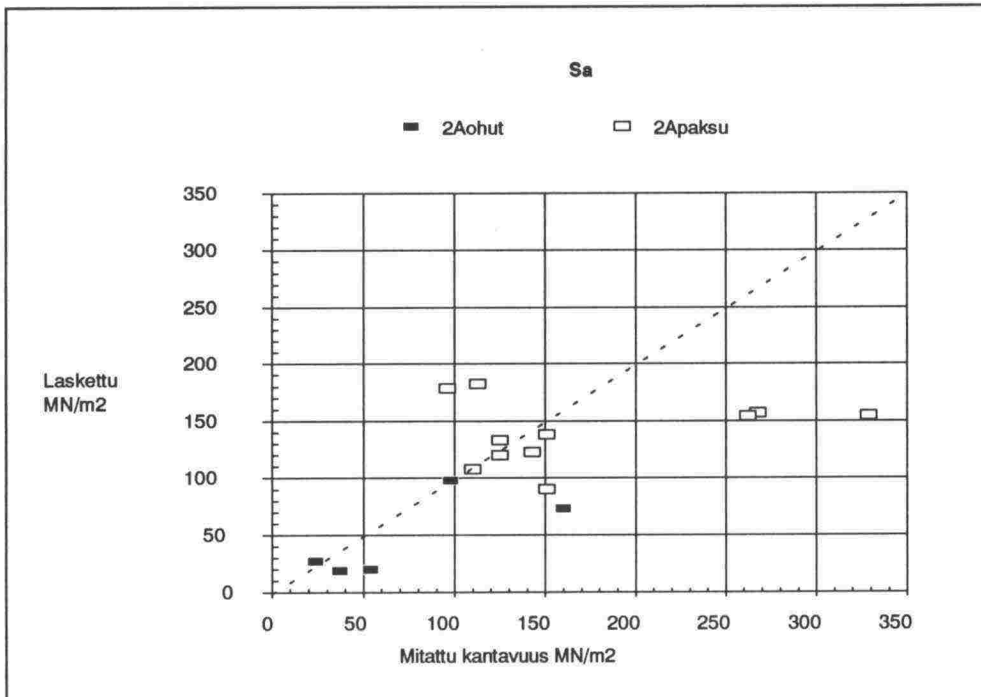
Useinkaan alusrakenteen kantavuuden arvon kaksinkertaistaminen tai puolittaminen ei merkittävästi vaikuttanut käytetyllä menetelmällä saatuun laskennalliseen kantavuuteen. Huomion arvoista on myös se, miten alusrakenteen kantavuuden sovittaminen mitoitusta ajatellen varmalle puolelle lisää tuntuvasti "ylivarmojen" pisteiden määrää.



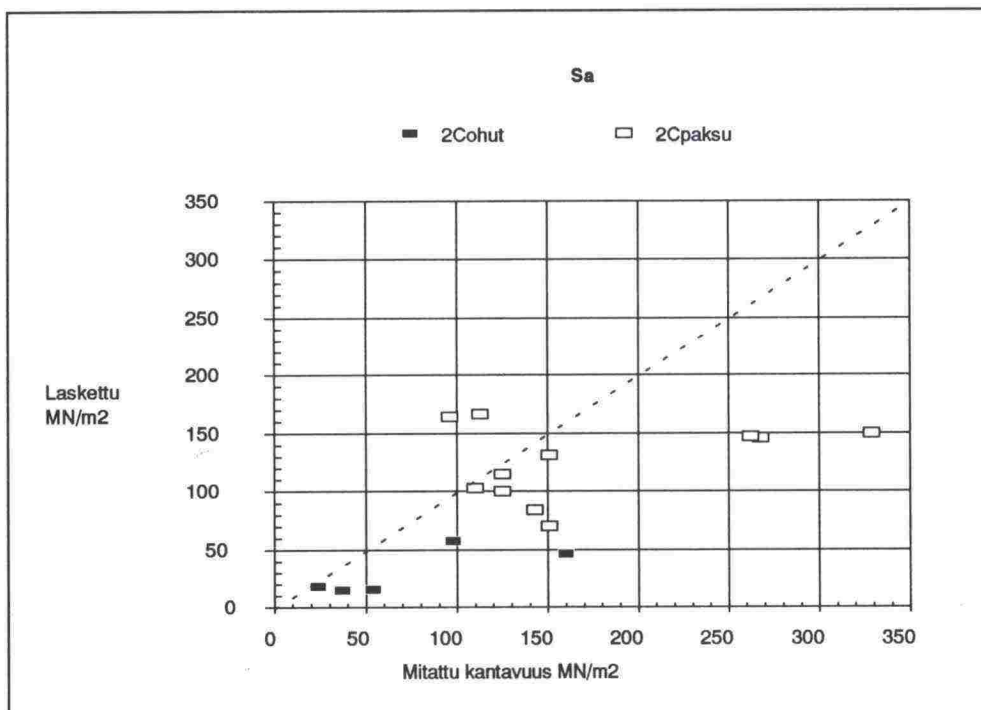
Kuva 83: Mitatut ja lasketut kantavuudet, kun alusrakenne on hiekkaa. Alusrakenteen kantavuutena on käytetty suunnitteluohjeen mukaista kantavuusarvoa 50 MN/m². Ohut tarkoittaa alle 0,7 m:n ja paksu yli 0,7 m:n päällysrakennetta.



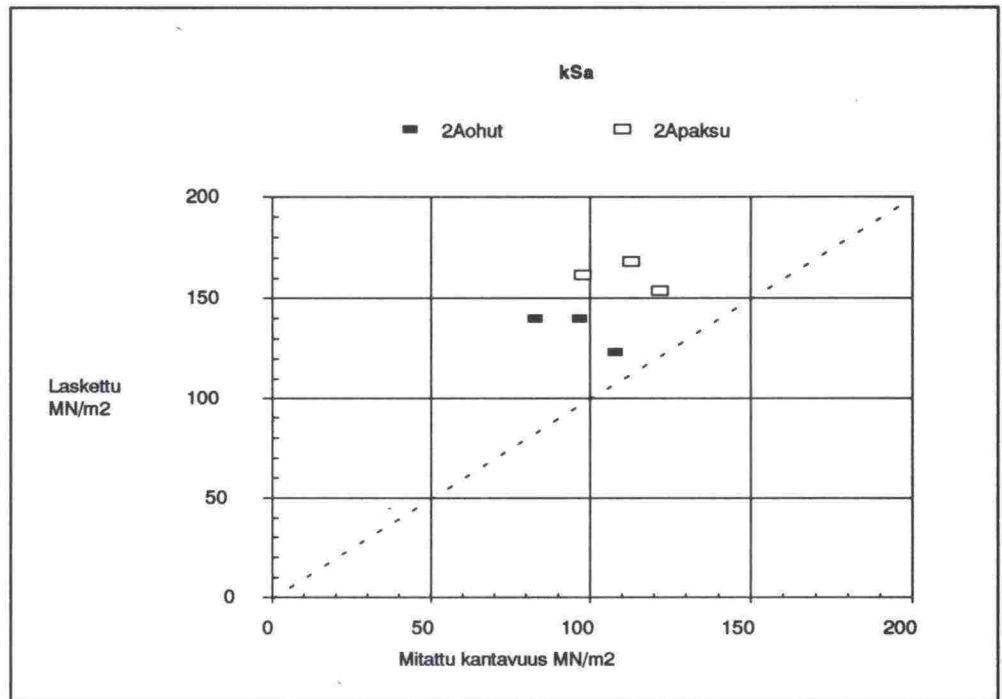
Kuva 84: Mitatut ja lasketut kantavuudet, kun alusrakenne on hiekkaa. Alusrakenteen kantavuutena on käytetty puolta suunnitteluohjeen arvosta.



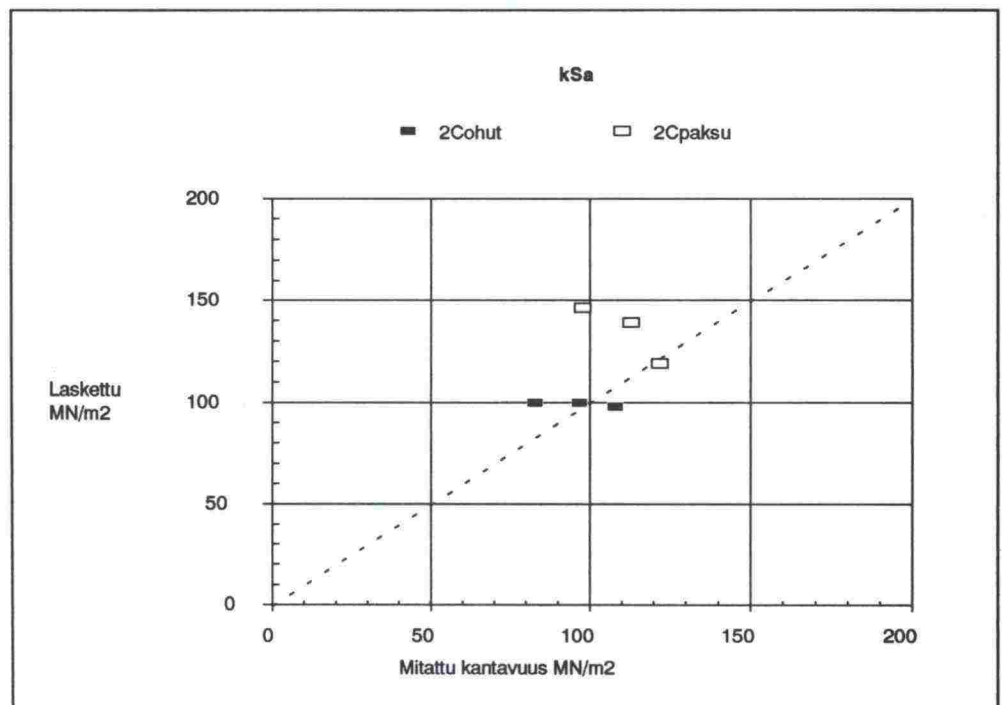
Kuva 85: Mitatut ja lasketut kantavuudet, kun alusrakenne on savea. Alusrakenteen kantavuutena on käytetty suunnitteluohjeen mukaista kantavuusarvoa 10 MN/m^2 . Ohut tarkoittaa alle $0,7 \text{ m:n}$ ja paksu yli $0,7 \text{ m:n}$ päällysrakennetta.



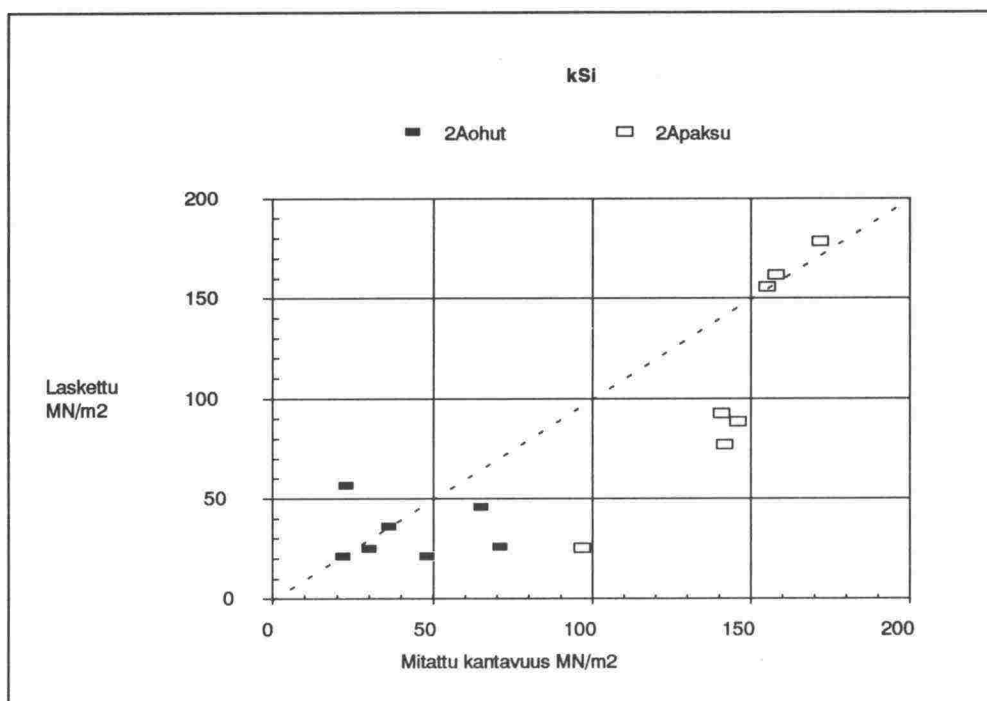
Kuva 86: Mitatut ja lasketut kantavuudet, kun alusrakenne on savea. Alusrakenteen kantavuutena on käytetty puolta suunnitteluohjeen arvosta.



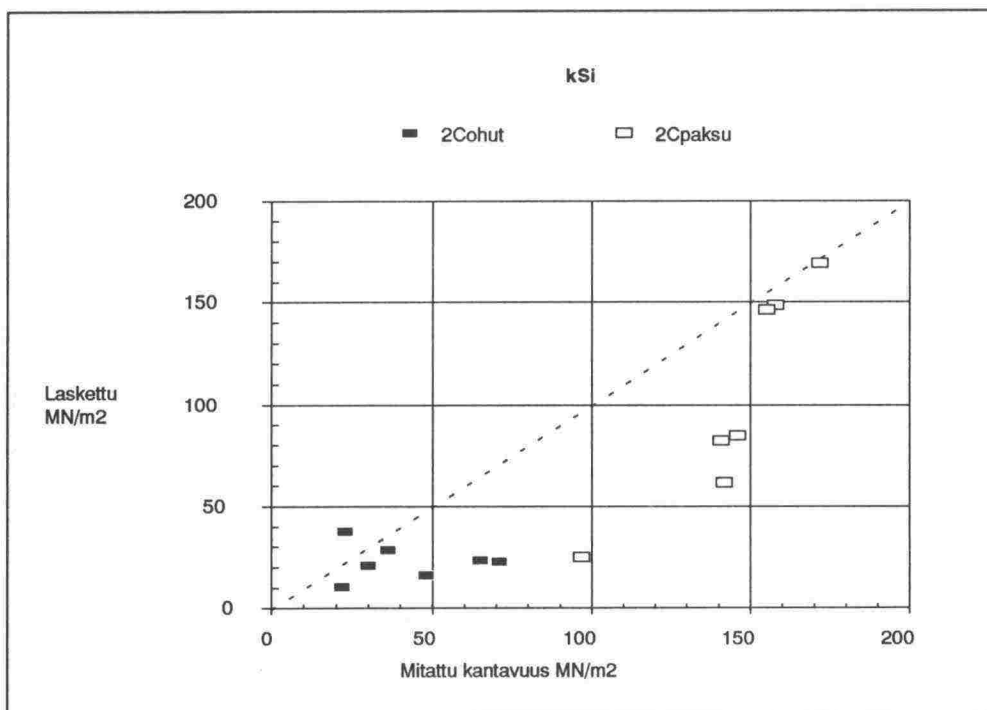
Kuva 87: Mitatut ja lasketut kantavuudet, kun alusrakenne on kuivaa savea. Alusrakenteen kantavuutena on käytetty suunnitteluohjeen mukaista kantavuusarvoa 20 MN/m^2 . Ohut tarkoittaa alle $0,7 \text{ m:n}$ ja paksu yli $0,7 \text{ m:n}$ päällysrakennetta.



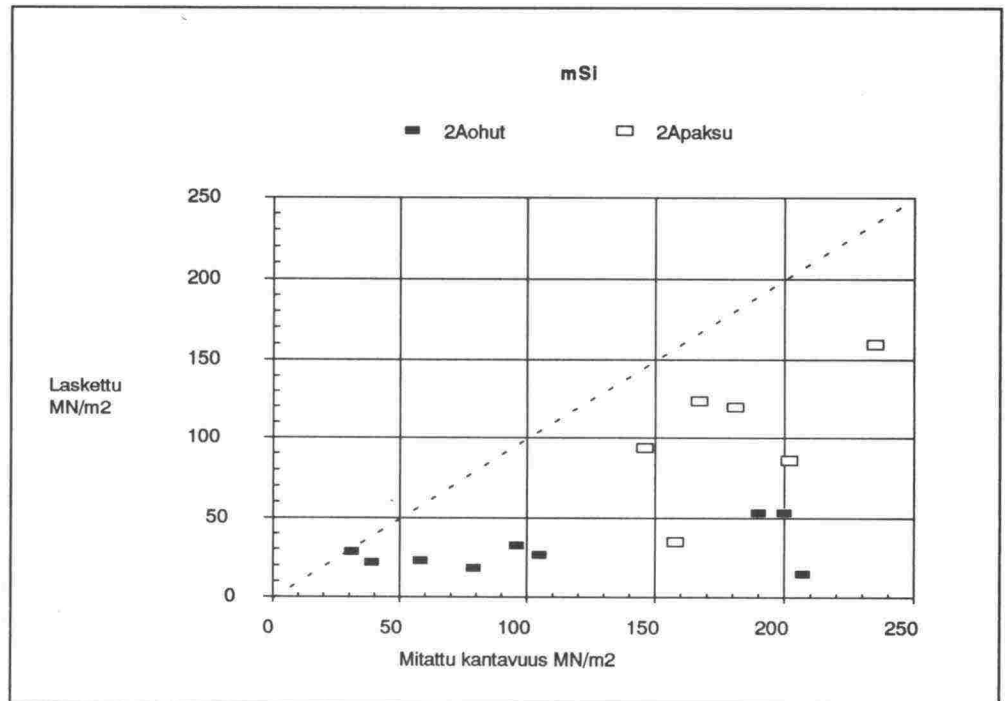
Kuva 88: Mitatut ja lasketut kantavuudet, kun alusrakenne on kuivaa savea. Alusrakenteen kantavuutena on käytetty puolta suunnitteluohjeen arvosta.



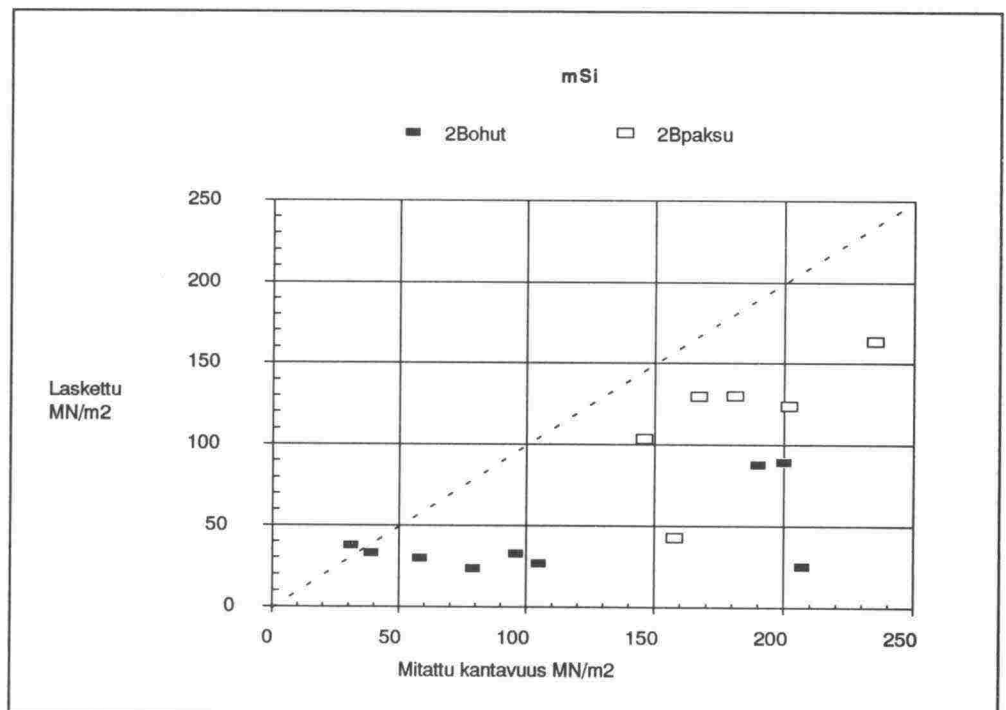
Kuva 89: Mitatut ja lasketut kantavuudet, kun alusrakenne on kuivaa silttiä. Alusrakenteen kantavuutena on käytetty suunnitteluohjeen mukaista kantavuusarvoa 10 MN/m^2 . Ohut tarkoittaa alle $0,7 \text{ m:n}$ ja paksu yli $0,7 \text{ m:n}$ päällysrakennetta.



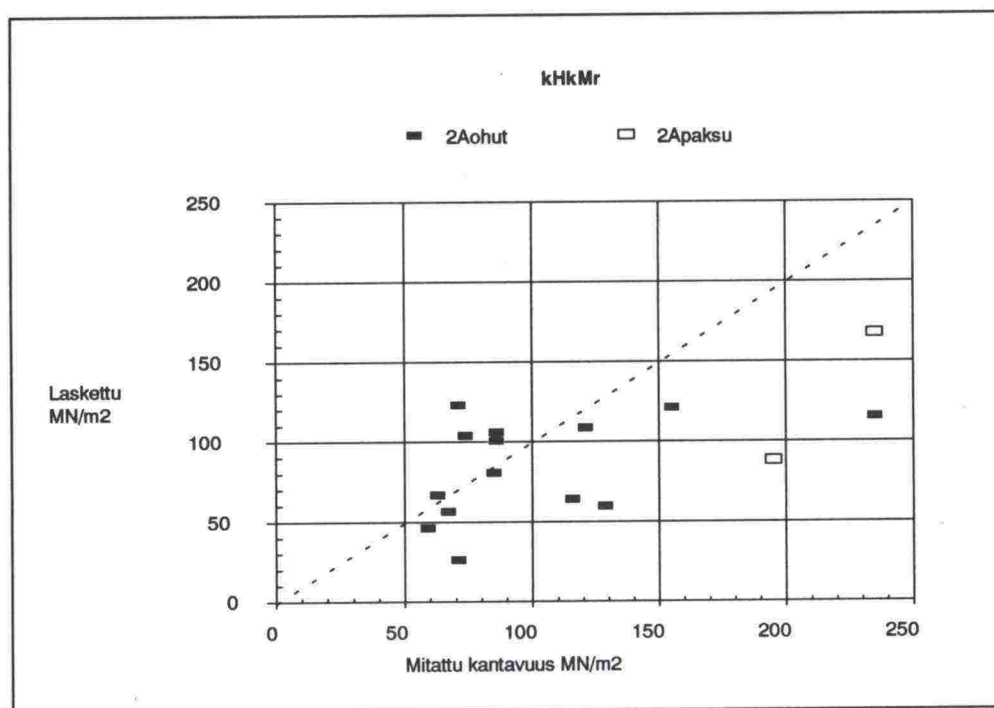
Kuva 90: Mitatut ja lasketut kantavuudet, kun alusrakenne on kuivaa silttiä. Alusrakenteen kantavuutena on käytetty puolta suunnitteluohjeen arvosta.



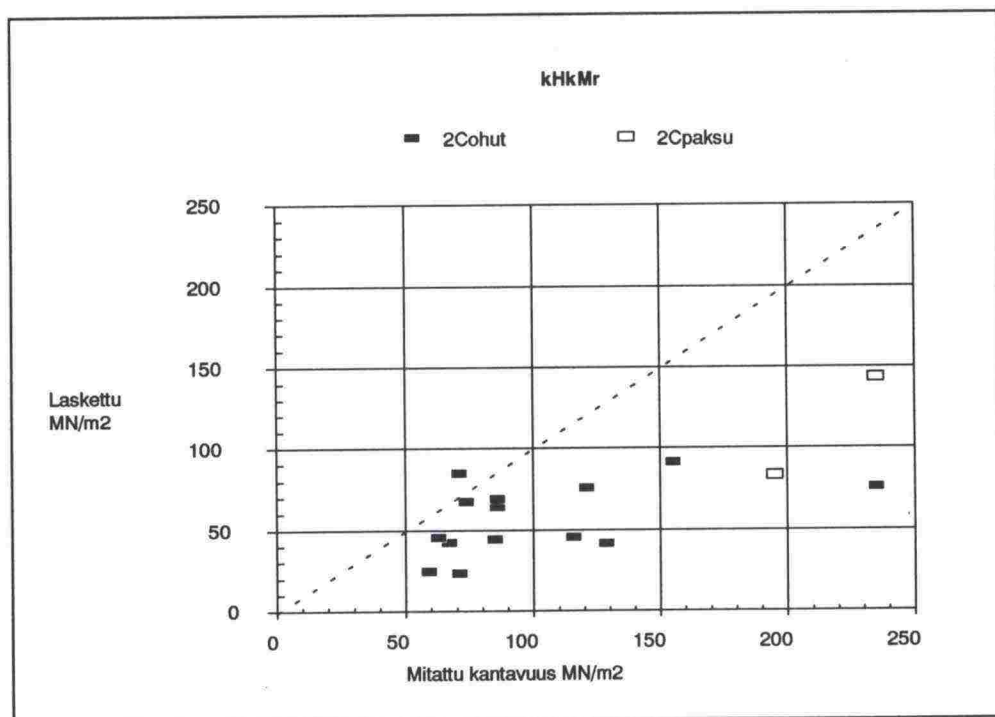
Kuva 91: Mitatut ja lasketut kantavuudet, kun alusrakenne on märkää siltiä. Alusrakenteen kantavuutena on käytetty suunnitteluohjeen mukaista kantavuusarvoa 5 MN/m². Ohut tarkoittaa alle 0,7 m:n ja paksu yli 0,7 m:n päällysrakennetta.



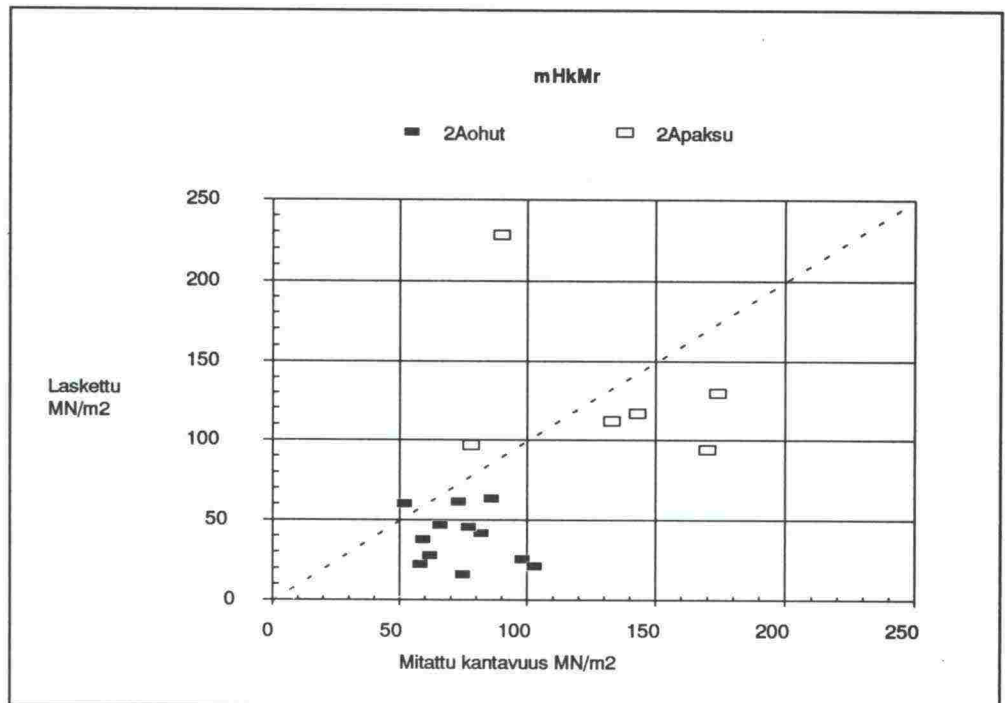
Kuva 92: Mitatut ja lasketut kantavuudet, kun alusrakenne on märkää siltiä. Alusrakenteen kantavuutena on käytetty kaksinkertaista suunnitteluohjeen arvoa.



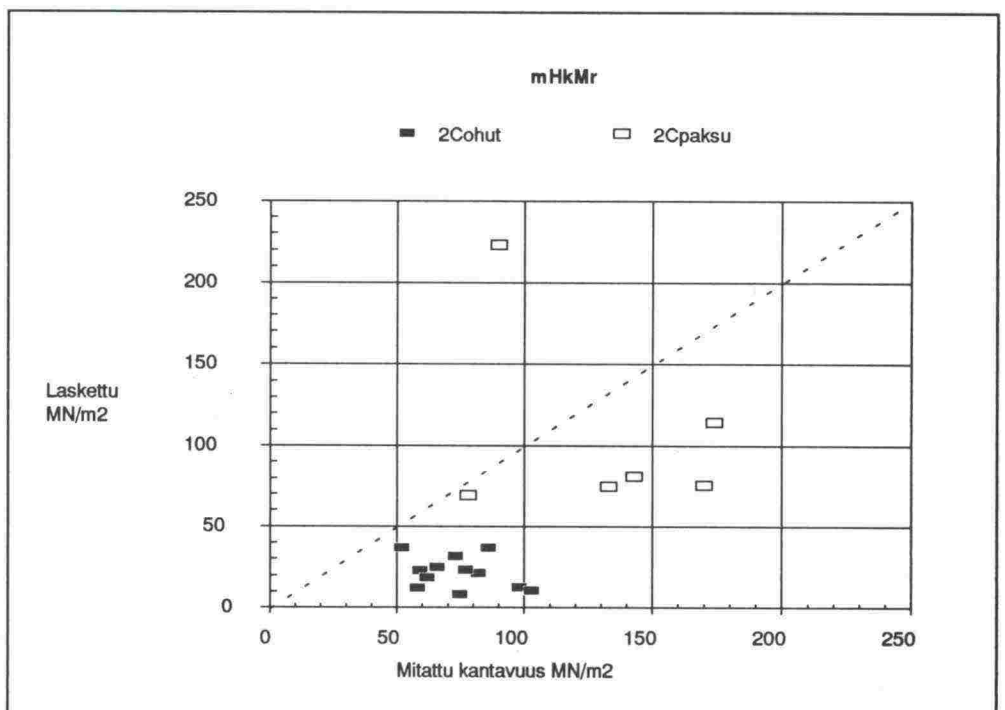
Kuva 93: Mitatut ja lasketut kantavuudet, kun alusrakenne on kuivaa hiekkamoreenia. Alusrakenteen kantavuutena on käytetty suunnitteluohjeen mukaista kantavuusarvoa 20 MN/m^2 . Ohut tarkoittaa alle $0,7 \text{ m}$:n ja paksu yli $0,7 \text{ m}$:n päällysrakennetta.



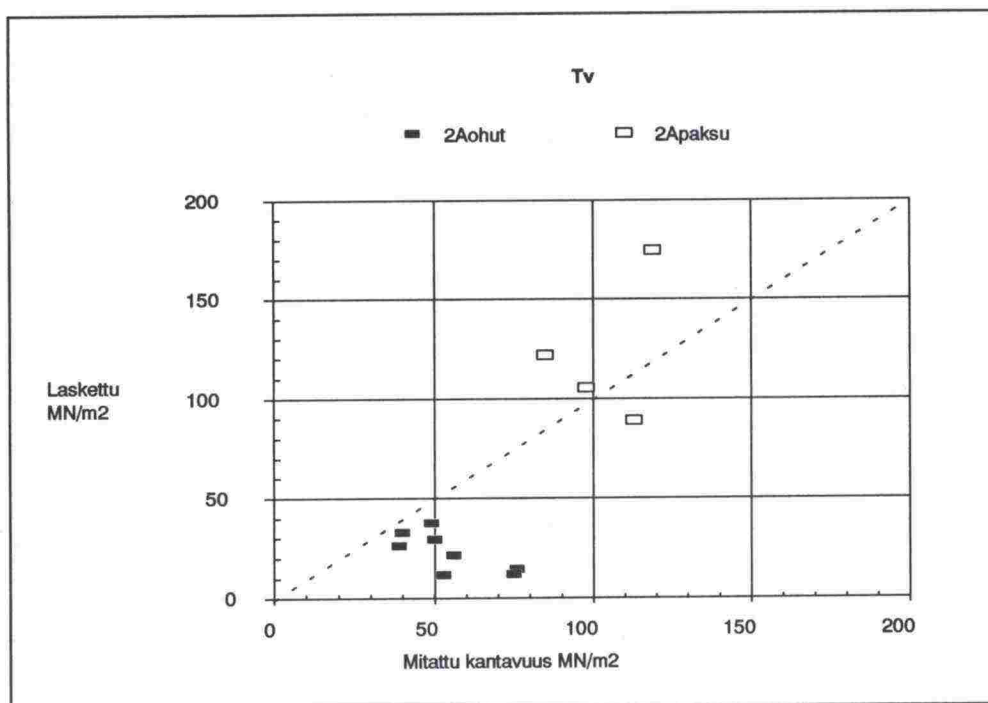
Kuva 94: Mitatut ja lasketut kantavuudet, kun alusrakenne on kuivaa hiekkamoreenia. Alusrakenteen kantavuutena on käytetty puolta suunnitteluohjeen arvosta.



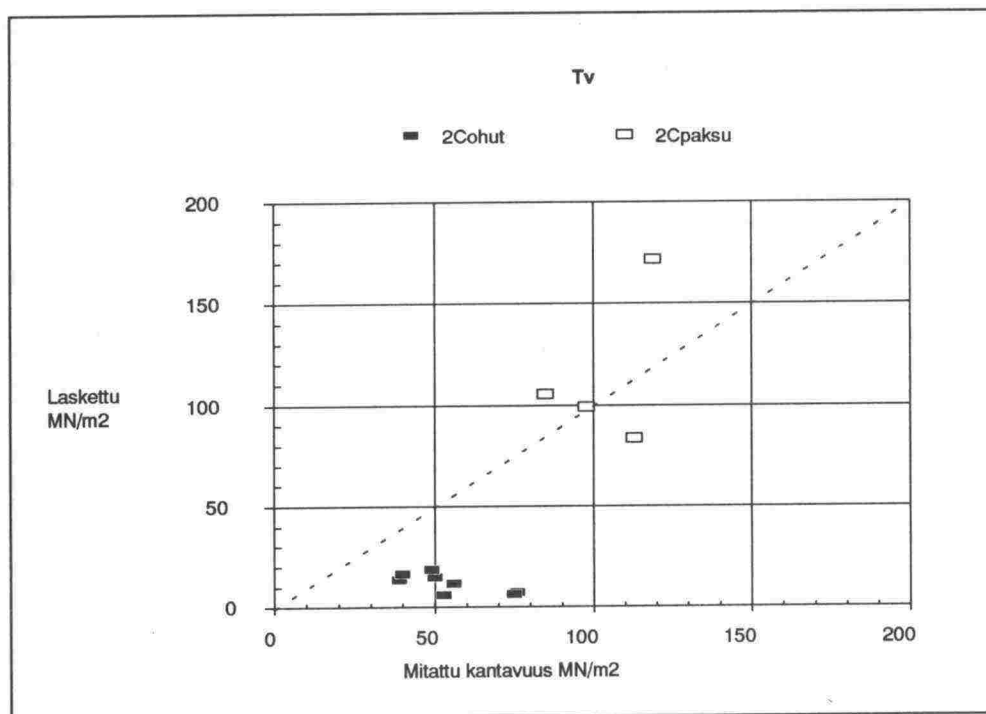
Kuva 95: Mitatut ja lasketut kantavuudet, kun alusrakenne on märkää hiekkamoreenia. Alusrakenteen kantavuutena on käytetty suunnitteluohjeen mukaista kantavuusarvoa 10 MN/m². Ohut tarkoittaa alle 0,7 m:n ja paksu yli 0,7 m:n päällysrakennetta.



Kuva 96: Mitatut ja lasketut kantavuudet, kun alusrakenne on märkää hiekkamoreenia. Alusrakenteen kantavuutena on käytetty puolta suunnitteluohjeen arvosta.



Kuva 97: Mitatut ja lasketut kantavuudet, kun alusrakenne on turvetta. Alusrakenteen kantavuutena on käytetty suunnitteluohjeen mukaista kantavuusarvoa 5 MN/m². Ohut tarkoittaa alle 0,7 m:n ja paksu yli 0,7 m:n päällysrakennetta.



Kuva 98: Mitatut ja lasketut kantavuudet, kun alusrakenne on turvetta. Alusrakenteen kantavuutena on käytetty puolta suunnitteluohjeen arvosta.

4.5. Laskentamenetelmien vertailu

Nykyään käytössä oleva kantavuusmitoitus perustuu tien heikoimman ajan kantavuuteen, jonka varmuussyistä oletetaan vallitsevan tiessä koko vuoden ajan. Mitoitusarvona käytettävä kantavuus saadaan kuitenkin alittaa osassa kohteen mittauspisteistä mittaustulosten hajonnan takia. Kun kantavuus vielä mitataan tien rakentamisen eri vaiheissa ja varmistetaan tavoitekantavuuden saavuttaminen, pitäisi tien varmuudella kestää sille tuleva liikennesäätös.

Mitattujen ja laskettujen kantavuuksien erot olivat joissakin kohteissa huomattavan suuret. Osalle pisteistä saatiin laskemalla liian hyviä kantavuuksia, mikä käytännössä saattaisi johtaa tien alimitoitukseen.

Tavoitekantavuudet lasketaan Odemarkin esittämällä kaksikerroskaavalla. Menetelmään on myöhemmin lisätty sitomattomien kerrosten E-moduulia koskeva ehto sekä ohje sidottujen kerrosten mitoitukseen. Kaavassa käytettävät E-moduulit ja kantavuudet ovat staattisia kimmomoduuleja, jotka vastaavat levykuormituskokeella saatavia arvoja.

Tierakenteen analyttistä mitoitusta varten on tehty useita tietokoneohjelmia, joista yhtä, ranskalaista Ecoroutea, verrattiin Tielaitoksen mitoituskaavaan muutamalla mallirakenteella (kuva 99).

Sitomattomien kerrosten E-moduulien suhteelle on esitetty alemman kerroksen E-moduulista ja päälle tulevan kerroksen paksuudesta riippuvaa rajoitusta (Shell; kaava 23).

$$E_2 = 0,206 \cdot h_2^{0,45} \cdot E_m \quad (23)$$

missä E_2 on päälle tulevan kerroksen E-moduuli, MN/m²

E_m on alemman kerroksen E-moduuli, MN/m²

h_2 on ylemmän kerroksen paksuus, mm

Tätä sovellettiin aluksi Ecorouten lähtöarvoihin. Odemarkin mitoituskaavaan perustuvassa ohjelmassa on mukana vastaavaa tarkoitusta varten menetelmään liitetty ehto (<6) lisättävän kerroksen E-moduulin suhteesta alta mitattuun kantavuuteen. Monikerroskaavaan (kaava 19 eli Kirk-Odemarkin kaava) perustuva kantavuustulos (Kirk) on laskettu ilman kerrosten suhteellisia moduulirajoituksia. Laskennan tulokset näkyvät taulukossa 13. Kun Ecoroute laskee ilman alkuarvoihin käytettyä moduulirajoitusta, tulos on lähes sama kuin Kirkin menetelmällä saatu, mikä ilmenee myös taulukosta 14.

RAKENNE 1	RAKENNE 2														
<table><tr><td>$E = 280 \text{ MN/ m}^2$</td><td>$H = 300, 400, 600 \text{ mm}$</td></tr><tr><td>$E = 25,50,75,150 \text{ MN/ m}^2$</td><td></td></tr></table>	$E = 280 \text{ MN/ m}^2$	$H = 300, 400, 600 \text{ mm}$	$E = 25,50,75,150 \text{ MN/ m}^2$		<table><tr><td>$E = 2500 \text{ MN/ m}^2$</td><td>$H = 100 \text{ mm}$</td></tr><tr><td>$E = 280 \text{ MN/ m}^2$</td><td>$H = 300, 400 \text{ mm}$</td></tr><tr><td>$E = 50,100,150 \text{ MN/ m}^2$</td><td></td></tr></table>	$E = 2500 \text{ MN/ m}^2$	$H = 100 \text{ mm}$	$E = 280 \text{ MN/ m}^2$	$H = 300, 400 \text{ mm}$	$E = 50,100,150 \text{ MN/ m}^2$					
$E = 280 \text{ MN/ m}^2$	$H = 300, 400, 600 \text{ mm}$														
$E = 25,50,75,150 \text{ MN/ m}^2$															
$E = 2500 \text{ MN/ m}^2$	$H = 100 \text{ mm}$														
$E = 280 \text{ MN/ m}^2$	$H = 300, 400 \text{ mm}$														
$E = 50,100,150 \text{ MN/ m}^2$															
RAKENNE 3	RAKENNE 4														
<table><tr><td>$E = 280 \text{ MN/ m}^2$</td><td>$H = 300, 400 \text{ mm}$</td></tr><tr><td>$E = 150 \text{ MN/ m}^2$</td><td>$H = 300, 600 \text{ mm}$</td></tr><tr><td>$E = 50,100,150 \text{ MN/ m}^2$</td><td></td></tr></table>	$E = 280 \text{ MN/ m}^2$	$H = 300, 400 \text{ mm}$	$E = 150 \text{ MN/ m}^2$	$H = 300, 600 \text{ mm}$	$E = 50,100,150 \text{ MN/ m}^2$		<table><tr><td>$E = 2500 \text{ MN/ m}^2$</td><td>$H = 100 \text{ mm}$</td></tr><tr><td>$E = 280 \text{ MN/ m}^2$</td><td>$H = 300, 400 \text{ mm}$</td></tr><tr><td>$E = 150 \text{ MN/ m}^2$</td><td>$H = 300, 600 \text{ mm}$</td></tr><tr><td>$E = 50,100,150 \text{ MN/ m}^2$</td><td></td></tr></table>	$E = 2500 \text{ MN/ m}^2$	$H = 100 \text{ mm}$	$E = 280 \text{ MN/ m}^2$	$H = 300, 400 \text{ mm}$	$E = 150 \text{ MN/ m}^2$	$H = 300, 600 \text{ mm}$	$E = 50,100,150 \text{ MN/ m}^2$	
$E = 280 \text{ MN/ m}^2$	$H = 300, 400 \text{ mm}$														
$E = 150 \text{ MN/ m}^2$	$H = 300, 600 \text{ mm}$														
$E = 50,100,150 \text{ MN/ m}^2$															
$E = 2500 \text{ MN/ m}^2$	$H = 100 \text{ mm}$														
$E = 280 \text{ MN/ m}^2$	$H = 300, 400 \text{ mm}$														
$E = 150 \text{ MN/ m}^2$	$H = 300, 600 \text{ mm}$														
$E = 50,100,150 \text{ MN/ m}^2$															
RAKENNE 5															
<table><tr><td>$E = 350 \text{ MN/ m}^2$</td><td>$H = 40 \text{ mm}$</td></tr><tr><td>$E = 200 \text{ MN/ m}^2$</td><td>$H = 400 \text{ mm}$</td></tr><tr><td>$E = 100 \text{ MN/ m}^2$</td><td>$H = 300 \text{ mm}$</td></tr><tr><td>$E = 50 \text{ MN/ m}^2$</td><td>$H = 400 \text{ mm}$</td></tr><tr><td>$E = 20 \text{ MN/ m}^2$</td><td></td></tr></table>	$E = 350 \text{ MN/ m}^2$	$H = 40 \text{ mm}$	$E = 200 \text{ MN/ m}^2$	$H = 400 \text{ mm}$	$E = 100 \text{ MN/ m}^2$	$H = 300 \text{ mm}$	$E = 50 \text{ MN/ m}^2$	$H = 400 \text{ mm}$	$E = 20 \text{ MN/ m}^2$						
$E = 350 \text{ MN/ m}^2$	$H = 40 \text{ mm}$														
$E = 200 \text{ MN/ m}^2$	$H = 400 \text{ mm}$														
$E = 100 \text{ MN/ m}^2$	$H = 300 \text{ mm}$														
$E = 50 \text{ MN/ m}^2$	$H = 400 \text{ mm}$														
$E = 20 \text{ MN/ m}^2$															

Kuva 99: Vertailussa käytetyt mallirakenteet. E-moduulit ja kerrospaksuudet.

Taulukko 13: Laskentamenetelmien vertailu kuvan 99 rakenteilla, kun sovelletaan moduulirajoitusta. H tarkoittaa kerroksen paksuutta (cm) ja E vastaavaa moduulia (MN/m²). ECO on Ecoroute-ohjelmalla laskettu kantavuus, ODE on Tielaitoksen käyttämällä kaksikerroskaavalla laskettu kantavuus ja KIR Kirkin esittämällä monikerroskaavalla laskettu kantavuus. (O-E)/E ja (K-E)/E ovat menetelmien ODE ja KIR suhteelliset erot Ecorouteen verrattuna.

H1	E1	H2	E2	H3	E3	H4	E4	Ea	ECO	ODE	KIR	(O-E)/E	(K-E)/E
R 5													
4	350	40	200	30	100	40	50	20	107	148	98	39 %	-8 %
R 4													
10	2500	30	280	30	130	-	-	50	217	306	216	41 %	0 %
10	2500	30	280	30	150	-	-	100	288	341	279	18 %	-3 %
10	2500	30	280	30	150	-	-	150	330	360	316	9 %	-4 %
10	2500	40	280	30	130	-	-	50	234	337	233	44 %	-1 %
10	2500	40	280	30	150	-	-	100	304	364	296	20 %	-3 %
10	2500	40	280	30	150	-	-	150	344	379	333	10 %	-3 %
10	2500	30	280	40	148	-	-	50	229	320	222	40 %	-3 %
10	2500	30	280	40	150	-	-	100	292	346	282	18 %	-3 %
10	2500	30	280	40	150	-	-	150	330	360	315	9 %	-5 %
10	2500	40	280	40	148	-	-	50	245	348	238	42 %	-3 %
10	2500	40	280	40	150	-	-	100	307	368	298	20 %	-3 %
10	2500	40	280	40	150	-	-	150	344	379	332	10 %	-3 %
R 3													
30	280	30	130	-	-	-	-	50	149	177	146	18 %	-2 %
30	280	30	150	-	-	-	-	100	195	204	185	5 %	-5 %
30	280	30	150	-	-	-	-	150	218	218	207	0 %	-5 %
40	280	30	130	-	-	-	-	50	164	200	159	22 %	-3 %
40	280	30	150	-	-	-	-	100	208	222	198	7 %	-5 %
40	280	30	150	-	-	-	-	150	230	234	219	1 %	-5 %
30	280	60	150	-	-	-	-	50	169	202	163	20 %	-3 %
30	280	60	150	-	-	-	-	100	201	213	194	6 %	-4 %
30	280	60	150	-	-	-	-	150	218	218	211	0 %	-3 %
40	280	60	150	-	-	-	-	50	181	220	174	22 %	-4 %
40	280	60	150	-	-	-	-	100	213	229	206	7 %	-3 %
40	280	60	150	-	-	-	-	150	230	234	223	1 %	-3 %
R 2													
10	2500	30	130	-	-	-	-	50	151	240	191	59 %	26 %
10	2500	30	261	-	-	-	-	100	266	313	271	18 %	2 %
10	2500	30	280	-	-	-	-	150	330	360	326	9 %	-1 %
10	2500	40	148	-	-	-	-	50	168	282	211	68 %	26 %
10	2500	40	280	-	-	-	-	100	291	342	290	18 %	0 %
10	2500	40	280	-	-	-	-	150	344	379	341	10 %	-1 %
R 1													
30	65.1	-	-	-	-	-	-	25	44	72	74	66 %	70 %
30	130	-	-	-	-	-	-	50	87	109	107	25 %	23 %
30	195	-	-	-	-	-	-	75	131	133	129	2 %	-1 %
30	200	-	-	-	-	-	-	100	151	151	147	0 %	-3 %
40	74.1	-	-	-	-	-	-	25	51	94	88	84 %	72 %
40	148	-	-	-	-	-	-	50	102	129	120	26 %	18 %
40	200	-	-	-	-	-	-	75	144	148	141	3 %	-2 %
40	200	-	-	-	-	-	-	100	160	163	157	2 %	-2 %
50	81.9	-	-	-	-	-	-	25	58	113	100	94 %	73 %
50	164	-	-	-	-	-	-	50	116	145	130	25 %	12 %
50	200	-	-	-	-	-	-	75	152	162	150	6 %	-1 %
50	200	-	-	-	-	-	-	100	167	173	163	4 %	-2 %
60	88.9	-	-	-	-	-	-	25	64	132	108	106 %	68 %
60	178	-	-	-	-	-	-	50	129	158	138	23 %	7 %
60	200	-	-	-	-	-	-	75	158	171	156	8 %	-1 %
60	200	-	-	-	-	-	-	100	171	180	168	5 %	-2 %

Taulukko 14: Laskentamenetelmien vertailu kuvan 99 rakenteilla ilman moduulirajoitusta. H tarkoittaa kerroksen paksuutta (cm) ja E vastaavaa moduulia (MN/m²). ECO on Ecoroute-ohjelmalla laskettu kantavuus, ODE on Tielaitoksen käyttämällä kaksikerroskaavalla laskettu kantavuus ja KIR Kirkin esittämällä monikerroskaavalla laskettu kantavuus. (O-E)/E ja (K-E)/E ovat menetelmien ODE ja KIR suhteelliset erot Ecorouteen verrattuna.

H1	E1	H2	E2	H3	E3	H4	E4	Ea	ECO	ODE	KIR	O-E/E	O-K/E
R 5													
4	350	40	200	30	100	40	50	20	107	148	98	39 %	-8 %
R 4													
10	2500	30	280	30	150	-	-	50	222	306	216	38 %	-2 %
10	2500	30	280	30	150	-	-	100	288	341	279	18 %	-3 %
10	2500	30	280	30	150	-	-	150	330	360	316	9 %	-4 %
10	2500	40	280	30	150	-	-	50	239	337	233	41 %	-2 %
10	2500	40	280	30	150	-	-	100	304	364	296	20 %	-3 %
10	2500	40	280	30	150	-	-	150	344	379	333	10 %	-3 %
10	2500	30	280	40	150	-	-	50	229	320	222	40 %	-3 %
10	2500	30	280	40	150	-	-	100	292	346	282	18 %	-3 %
10	2500	30	280	40	150	-	-	150	330	360	315	9 %	-5 %
10	2500	40	280	40	150	-	-	50	246	348	238	42 %	-3 %
10	2500	40	280	40	150	-	-	100	307	368	298	20 %	-3 %
10	2500	40	280	40	150	-	-	150	344	379	332	10 %	-3 %
R 3													
30	280	30	150	-	-	-	-	50	153	177	146	15 %	-5 %
30	280	30	150	-	-	-	-	100	195	204	185	5 %	-5 %
30	280	30	150	-	-	-	-	150	218	218	207	0 %	-5 %
40	280	30	150	-	-	-	-	50	167	200	159	20 %	-5 %
40	280	30	150	-	-	-	-	100	208	222	198	7 %	-5 %
40	280	30	150	-	-	-	-	150	230	234	219	1 %	-5 %
30	280	60	150	-	-	-	-	50	169	202	163	20 %	-3 %
30	280	60	150	-	-	-	-	100	201	213	194	6 %	-4 %
30	280	60	150	-	-	-	-	150	218	218	211	0 %	-3 %
40	280	60	150	-	-	-	-	50	181	220	174	22 %	-4 %
40	280	60	150	-	-	-	-	100	213	229	206	7 %	-3 %
40	280	60	150	-	-	-	-	150	230	234	223	1 %	-3 %
R 2													
10	2500	30	280	-	-	-	-	50	192	240	191	25 %	0 %
10	2500	30	280	-	-	-	-	100	272	313	271	15 %	0 %
10	2500	30	280	-	-	-	-	150	330	360	326	9 %	-1 %
10	2500	40	280	-	-	-	-	50	212	282	211	33 %	-1 %
10	2500	40	280	-	-	-	-	100	291	342	290	18 %	0 %
10	2500	40	280	-	-	-	-	150	344	379	341	10 %	-1 %
R 1													
30	200	-	-	-	-	-	-	25	74	72	74	-3 %	0 %
30	200	-	-	-	-	-	-	50	108	109	107	1 %	-1 %
30	200	-	-	-	-	-	-	75	132	133	129	1 %	-2 %
30	200	-	-	-	-	-	-	100	151	151	147	0 %	-3 %
40	200	-	-	-	-	-	-	25	87	94	88	7 %	1 %
40	200	-	-	-	-	-	-	50	121	129	120	6 %	-1 %
40	200	-	-	-	-	-	-	75	144	148	141	3 %	-2 %
40	200	-	-	-	-	-	-	100	160	163	157	2 %	-2 %
50	200	-	-	-	-	-	-	25	98	113	100	15 %	2 %
50	200	-	-	-	-	-	-	50	131	145	130	11 %	-1 %
50	200	-	-	-	-	-	-	75	152	162	150	6 %	-1 %
50	200	-	-	-	-	-	-	100	167	173	163	4 %	-2 %
60	200	-	-	-	-	-	-	25	107	132	108	24 %	1 %
60	200	-	-	-	-	-	-	50	139	158	138	13 %	-1 %
60	200	-	-	-	-	-	-	75	158	171	156	8 %	-1 %
60	200	-	-	-	-	-	-	100	171	180	168	5 %	-2 %

Tuloksista näkyy, että Tielaitoksen mitoituskaavalla (vastaa kaavaa 17 sivulla 19) lasketut kantavuudet ovat suurempia kuin Ecoroute-ohjelmalla lasketut kantavuudet. Suurimmat erot ilmenivät silloin, kun alusrakenne oli heikkoa. Ero kasvoi myös, kun laskettavien kerrosten määrä lisääntyi. Kaksikerrosrakenteella (RAKENNE 1) tulokset olivat samaa luokkaa molemmilla tavoilla laskettuna niin kauan kuin rakennekerros oli riittävän ohut, mikä myös oli odotettavissa.

Tielaitoksen menetelmässä käytetty kantavuusraja (<6) vaikutti esimerkkeinä käytetyillä rakenteilla paljon vähemmän kuin Shellin kaava, jolla kerrosten E-moduuleja rajoitettiin. Shellin kaavan vaikutus käy selvästi ilmi, kun verrataan toisiinsa molempien taulukoiden laskennassa käytettyjä E-moduuleja, jotka "materiaalimoduuleina" ovat samat, mutta "hyötymoduuleina" poikkeavat toisistaan.

Kokeiltiin myös, mitä vaikuttaa jos kaksikerrosrakenne lasketaan useammassa osassa. Käytetyllä rakenteella osiin jakamisella ei ollut merkitystä, sillä Odemarkilla (mitoituskaava) saadut kantavuustulokset muuttuivat vain desimaaliosaltaan.

Esimerkkirakenteiden laskettujen kantavuuksien vertailu osoittaa eron, mikä syntyy monikerroskaavalla ja kaksikerroskaavalla laskettaessa. Jos hyväksytään ajatus, että sitomattomille eli vetoa kestäättömille rakennekerrosmateriaaleille voidaan laskea vain kaavan 23 mukainen E-moduuli, mitoituskaavan käyttöön liittyvä "suhteellinen virhe" vaihtelee 0%:sta 106%:iin ja sillä saadaan aina teoreettisia suurempia kantavuuksia.

5. TULOSTEN TARKASTELU

5.1. Tierakenteen kantavuusvaihtelu

Kantavuusmittaukset oli tehty epäsäännöllisesti ja ne painottuivat monella koealueella kevääseen. Kesäisin ja alkusyksyllä mittauksia olisi saanut olla tiheämmin, kesälomien aika on usein jäänyt kokonaan tutkimatta. Jotta voitaisiin muodostaa malleja tierakenteen käyttäytymisestä, tarvittaisiin ainakin tarkempaa tietoa pohjavesistä eli pistekohtaisia mittauksia. Sateiden vaikutus tierakenteen kosteustilanteeseen ja sen myötä kantavuuteen on ilmeinen, mutta pelkillä sateiden vesimäärillä sitä ei voida riittävän hyvin ennustaa. Tarvittaisiin myös tietoja siitä, missä kosteustilassa rakenne on, miten suuri osa sateesta pääsee rakenteeseen ja miten nopeasti ylimääräinen vesi poistuu. Tiedot sateiden rankkuuksista ja kestosta saadaan luotettavasti vain koealueella tehtävistä mittauksista. Yleisesti voidaan todeta, että mitään yksinkertaista ja käyttökelpoista mallia eri säätekijöiden vaikutuksesta ei tutkittujen havaintojen perusteella voitu muodostaa, koska saadut korrelaatiot olivat liian pieniä.

Kantavuuden vuodenaikavaihteluihin kuuluu oleellisesti myös rakenteen tiivistyminen, johon eniten vaikuttaa raskas liikenne. Tiivistymisen nopeutta ja sen riippuvuutta kosteustilasta sekä eri suuruisten sademäärien vaikutusta kunkin rakennekerroksen kosteuteen voitaisiin tutkia lähemmin. Mittauksiin tulisi liikennemäärän lisäksi liittää pistekohtaiset sade- ja pohjavesihavainnot unohtamatta myöskään edeltävän routatilanteen selvittämistä.

5.2. Laskennalliset kantavuudet

Tielaitoksen suunnitteluohjeissa olevaa kaavaa on alunperin tarkoitettu käytettäväksi rakenteessa, jossa kerroksia on kaksi. Jos tällä kaavalla lasketaan kantavuuksia pohjamaasta lähtien, kerros kerrokselta ylöspäin, käytetään periaatteessa aina samansuuruista kuormitusta kaikkien kerrosten pinnassa. Tämä on ristiriidassa sen teorian kanssa, mihin kaava perustuu; pystysuorat normaalijännitykset pienenevät - sekä teoriassa että mittauksen perusteella - syvyyden kasvaessa. Laskentamenetelmän käytössä voi tulla virheitä myös siitä syystä, että päällekkäisten kerrosten E-moduuleilla ei edellytetä olevan selvää suuruuseroa. On nimittäin esitetty, että Odemarkin ekvivalenttipaksuuksiin perustuvaa menetelmää voisi käyttää kahdella ehdolla /1/:

1. E-moduuli pienenee ylhäältä alaspäin vähintään kertoimella kaksi
2. Kerroksen ekvivalenttipaksuus on suurempi kuin kosketuspinnan säde

Kuormitusmitoitusmenetelmä perustuu heikoimpiin kantavuuksiin. Kevään heikoin aika kestää vain osan vuotta, mutta kevätkantavuutta käytetään ikään kuin se olisi pysyvä tien kantavuusarvo. Tulosten perusteella voidaan ajatella, että käytetyllä mitoitusmenetelmällä saatavaa varmuutta ei olisikaan niin paljon kuin vuoden-aikavaihtelusta johtuva ajoittainen kantavuuden paraneminen tuo mukanaan. Vaikka suurin osa lasketuista kantavuuksista sijoittui mitattuja kevätkantavuuksia alemmaksi, joukossa oli monta tapausta, joissa todellinen kantavuus jää laskettua huonommaksi.

Laskentatulosten hajonta oli huomattavan suurta. Ilmeistä on, että mitoitushjeessa esitettyjä E-moduuleja ei saa, eikä E-moduuleja yleensääkään, pitää vakioarvoina. Niiden suuruus tiessä riippuu aina kaikista muista rakennekerroksista; kerrosten kimmo-ominaisuuksista ja paksuuksista sekä niiden keskinäisestä sijainnista.

5.3. E-moduulit

Tielaitoksen mitoitustaavaan perustuvalla takaisinlaskennalla saatuja alusrakenteen kantavuuksia voidaan verrata suunnitteluohjeen arvoin rakenneluokkien r5 ja r4 osalta (taulukko 15). Muut luokat ovat havaintojen vähäisyyden takia vailla tilastollista merkitystä. Maalajin määrittäminen kahden läpäisyarvon perusteella saattaa olla epätarkka. Luokat s, h ja hh on katsottu routimattomiksi, muut luokat ovat routivia maalajeja.

Taulukossa rakenneluokat on sijoitettu suunnilleen niitä vastaavien maalajien tarkennusten kohdalle. Vaihtoehtoon 1 mukaiset kantavuudet ovat lähellä ohjeessa annettuja arvoja lukuunottamatta luokkaa r4, joka on lähinnä routivaa hiekkaa tai hiekkamoreenia, ja luokkaa r5, joka tässä sisältää silttisten maalajien lisäksi myös savet ja turpeet. Molempien kantavuudelle saatiin ohjetta suurempia arvoja.

Taulukko 15: Suunnitteluohjeessa alusrakenteelle annetut ja vastaavat iteroidut kantavuudet (MN/m²) keskiarvoina vaihtoehtoilla VE1...VE3

			OHJE	ITEROIDUT
Maalaji	Tarkennus	Luokka	Kantavuus MN/m ²	Luokka;k.arvo 1; k.arvo 2; k.arvo 3
Kallio	kallio	A	A=300	
	louhe	A		
	murske	A		
Kivet		A	B=200 (150...280)	s; 298; 137; 118
Sora		B		
Soramoreeni	routimaton	C		
	routiva	E (F)		
Hiekka	routimaton karkea	C	C=100 (70...150)	hh; 145; 80; 65
	routimaton keskikarkea	D		
	routimaton hieno	D (E)	D=50 (35...70)	h; 40; 40; 30
	routiva keskikarkea	E		
	routiva hieno	E (F)		
Hiekkamoreeni	routimaton	D (E)	E=20 (15...35)	r4; 171; 153; 111
	routiva	E (F)		
Siltti		F (G), (E)	F=10 (5...15)	r5; 24; 48; 48
Silttimoreeni		F (G), (E)		
Savi	kuivakuori (h ≥ 1m)	E		
	sitkeä (Su ≥ 25kN/m ²)	F (E)		
	pehmeä (Su < 25kN/m ²)	G		
		G		
Lieju		G		
Turve		G		

Pudotuspainolaitteilla tehtyjen mittausten perusteella arvioitiin alemman kerroksen E-moduuleja. Laskentatavasta johtuen alusrakennetta heikoimmillaan kuvaavat parhaiten seuraavassa taulukossa lihavoidulla kirjoitetut arvot. Alusrakenteeseen saattaa nimittäin jossakin tapauksessa sisältyä myös suodatinhiekkää. Päälysrakenne on ohuin rakentamattomilla teillä (rtn). Rtu tarkoittaa rakennettua tietä ja krp tai rrp parannettua tietä.

Taulukko 16: Taipumasuppiloista arvioituja alemman kerroksen dynaamisia E-moduuleja.

Alusrakenne	Rakenne- tyyppi	10 pienimmän keskiarvo, MN/m ²	Pienin arvo, MN/m ²
Sa	rtn	11.8	8
kSi	rtn	13.7	11
mSi	rtn	18.5	15
kSa	rrp	24.3	9
Hk	rtu	29.3	25
mHkMr	rtn	33.3	29
mHkMr	rtu	36.6	31
kHkMr	rtn	36.7	32
kHkMr	rtu	38.3	28
Tv	rtn	38.7	28
Sa	rtu	51.5	44
Sa	krp	55.4	47
Hk	rtn	63.7	52
kSi	krp	66.3	56
mSi	krp	69.2	51

Tielaitoksen ohjeisiin verrattuna vain turve poikkeaa huomattavasti suuremmalla kantavuusarvollaan. "Kuivien" ja "märkien" maalajien kantavuudella ei näytä olevan niille oletettua suuruuseroa (kuiva savi sai huonompia kantavuuksia kuin ei kuiva!). Saatuja E-moduuleja voidaan myös verrata Ruotsissa vastaavalla tavalla saatuihin tuloksiin kevätarvojen osalta:

Taulukko 17: Ruotsissa mitattuja dynaamisia E-moduuleja (MN/m²) /6/

Maalaji	kevät	kesä ja syksy
sorainen hiekka	143	151
silttinen moreeni	135	203
hiekka/sora	102	109
savinen moreeni	92	125
sorainen hiekka	72	77
siltti	35	54
savi	20	28
kerroksellinen silttinen savi	14	39

Alusrakenteen ollessa hiekkaa taipumasuppilon perusteella arvioitujen kantavuu-
det kävivät hetkellisesti yllättävän alhaalla. E-moduuli oli silloin noin puolet
ruotsalaisesta kevätarvosta. Moreenisilla pohjamailla Ruotsissa on mitattu varsin
suuria E-moduulin arvoja: roudan sulamis aikaan 92 MPa ja 135 MPa. Alemman
kerroksen E-moduulille saatiin moreenimaalajeilla noin puolet pienempiä arvoja,
mikä voi johtua siitä, että nyt tiheämmillä mittauksilla olisi osuttu juuri heikoimpaan
aikaan. E-moduulien kasvaminen oli alusrakenteessa melko hidasta pohjamaan
sulamisen jälkeen ja yleensä alusrakenteen kantavuuden vaihtelu oli melko
vaimeaa.

Millään tutkitulla maalajilla ei Ruotsissa havaittu selvää riippuvuutta E-moduulien ja
vesipitoisuuden välillä /6/. Pohjaveden asemalla on kuitenkin todettu olevan suuri
merkitys. Myös Oulun koealueilla melko vähäiset pohjaveden pinnan vaihtelut ovat
näkyneet kantavuuksissa, joten ainakin hyvin suuret kosteusprosentit vaikuttavat
E-moduuleihin. Dynaaminen kantavuusmittaus ei saa aikaan sellaista huokosveden
virtausta kuin hidas Benkelman-koe tai levykuormituskoe, joten kosteuden vaikutus
kimmomoduliin (palautuvaan muodonmuutokseen) voi jäädä pieneksi. Yksin E-
moduuleilla ei kuitenkaan vielä täysin selitetä tierakenteen käyttäytymistä. Myös
pysyvät (plastiset) muodonmuutokset ovat haitallisia ja vaikuttavat tien kestoikään.

6. YHTEENVETO

Tierakenteen kantavuus vaihtelee vuodenaikojen mukaan. Talvella rakenne on jäässä, bitumilla sidotut kerrokset ovat hyvin jäykkiä ja kantavuus on hyvä. Routa on muodostuessaan lisännyt rakenteen tilavuutta ja vesipitoisuus on kohonnut suureksi. Kun sulaminen keväällä alkaa, on tierakenteen tiiviys huonontunut ja sulava ylimääräinen vesi täyttää huokostilan. Kun rakenne kyllästyy vedellä, kuormituksen aiheuttama paine alkaa muuttua hydrostaattiseksi. Tien ollessa normaalikosteudessa kuormitus siirtyy materiaalirakeiden välityksellä ja jännitykset suuntautuvat pääasiallisesti alaspäin, mutta hydrostaattinen paine vaikuttaa samansuuruisena joka suuntaan. Heikko tiiviys ja huokosvesi yhdessä aiheuttavat kantavuuden heikkenemisen. Tätä heikointa kantavuutta sanotaan kevät-kantavuudeksi.

Tierakenteen sulaminen tapahtuu tavallisesti kesäkuussa. Heikoimman kantavuuden ajankohtaan vaikuttavat enemmän paikalliset olosuhteet, kuten pohjaveden asema ja rakennusmateriaalit, kuin edellisen talven pakkaset. Pakkasmäärällä ei ole kovin paljon vaikutusta siihen, miten raju kantavuuden kevät-heikkenemisestä tulee. Merkittävää kuitenkin on, miten nopeasti routa muodostuu. Edellisen kesän lämpö määrä ja noin kahden ensimmäisen pakkasviikon pakkasmäärä eli roudan nopeus selittivät parhaiten AB-teiden kevät-kantavuutta, mikä saattaa johtua paitsi mustan päällysteen kyvystä imeä lämpösäteilyä myös siitä, että AB-tiet on yleensä rakennettu parhaiten myös kosteutta ajatellen.

Kun tierakenne on sulanut, alkaa tiivistyminen ja kuivuminen. Liikennemääristä ei ollut tietoja. Liikennemäärät ja päällystetyyppi ovat kuitenkin sidoksissa toisiinsa. Oletettavasti juuri liikenteen tiivistävä vaikutus on merkittävä kantavuuden palautumisvaiheessa. Tavallisesti juhannuksen jälkeen alkaa kausi, jolloin kantavuusvaihtelut johtuvat sateiden ja pohjaveden vaihteluista. Eri tiet käyttäytyvät kuitenkin eri tavalla. Edeltävän sademäärän vaikutus kesä-kantavuuteen on voimakkain, kun kertynyt sade lasketaan noin kahden viikon ajalta ennen kantavuusmittausta. Pohjaveden asema vaikuttaa enemmän Benkelman-kantavuuksiin kuin pudotuspainolaitteella mitattuihin kantavuuksiin.

Syksyllä runsaat sateet saattavat aiheuttaa toisen heikon kantavuusjakson lähinnä sorateillä. Sen sijaan AB-teillä kantavuus tavallisesti paranee, koska bitumeilla sidottujen päällysteiden E-moduulit kasvavat lämpötilan laskiessa. Jäätyminen nostaa kantavuuden moninkertaiseksi kaikilla teillä.

Kantavuuden laskeminen materiaalien kimmo-ominaisuuksien perusteella on tehty soveltamalla Odemarkin esittämää menetelmää. Voimassa olevan Tielaitoksen suunnitteluohjeen mukaan laskemalla saadut kantavuudet poikkeavat jonkin verran mitatuista kevät-kantavuuksista. Yksi syy siihen, että eroja syntyy, on sovelletun

kaavan käyttäminen sen pätevyysalueen ulkopuolella. Kimmoteoriaan nojautuen lasketaan kuormituksen rakenteelle aiheuttamaa painumaa, joka on kerroksellisessa rakenteessa kerrosten kokoonpuristumien ja pohjamaan painuman summa. Monikerroskaavan ja kaksikerroskaavan, monta kertaa peräkkäin käytettynä, välille syntyy periaatteellinen ero siitä, että edellisessä tapauksessa kuormitus vaikuttaa tien pinnalta ja jälkimmäisessä tapauksessa samansuuruinen kuorma puristaa aina kaikkia kerroksia niiden päällä olevista kerroksista riippumatta. Käytännössä heikon alusrakenteen merkitys vähenee aina, kun kaksikerroskaavaa käytetään uudestaan.

KIRJALLISUUSLUETTELO

1. Ullitz, P. Pavement Analysis. Developments in Civil Engineering, 19. Lyngby, Denmark 1987.
2. Majidzadeh, K. An overview of deflection parameters for performance analysis. International Symposium on Bearing Capacity of Roads and Airfields. Trondheim, Norwaw. June 23 - 25, 1982. Norwegian Institute of Technology. s. 22 - 30.
3. Lehtinen, E. Soratien kantavuus. Lisensiaattityö. Helsinki 1965. 214 s.
4. Jansson, H. Fallviktsmätning som underlag för vägförstärkningsåtgärd. Linköping 1981. Statens väg- och trafikinstitut. VTI meddelande 229. 43 s.
5. Lampinen, A. Variation av bärigheten i vägens tvärprofil. Espoo 1983. VTT Tie-ja liikennelaboratorio, Tutkimusraportteja 222. 49 s.
6. Wiman, L. Samband mellan undergrundens jordart och tillstånd och dess dynamiska E-modul (medelmodul) vid olika årstider. Linköping 1982. VTI 308. 50 s.
7. Abe, Y. Factors influencing the bearing capacity. International Symposium on Bearing Capacity of Roads and Airfields. Trondheim, Norwaw. June 23 - 25, 1982. Norwegian Institute of Technology. s. 286 - 296.
8. The Asphalt Institute, Research and Development of The Asphalt Institute's Thickness Design Manual (MS-1). Ninth edition. Maryland 1982. 204 s.
9. Boms, B.B. Effect of degree of saturation on bearing capacity of flexible pavements. Hwy Res Board, annual meetings 1964, 1965. Washington 1965. Highway Research Record No 71. s. 1 - 14.
10. Nordal, R.S. Detection and prediction of seasonal changes of the bearing capacity at the Vormsund test road. International Symposium on Bearing Capacity of Roads and Airfields. Trondheim, Norwaw. June 23 - 25, 1982. Norwegian Institute of Technology. s. 374 - 382.
11. Chamberlain, E.J. Statistical evaluation of soil and climatic parameters affecting the change in pavement deflection during thawing of subgrades. Hanover, New Hampshire 1981. U.S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory. 11 s.

12. Esch, D.C., McHattie, R. Prediction of roadway strength from soil properties. International Symposium on Bearing Capacity of Roads and Airfields. Trondheim, Norwaw. June 23 - 25, 1982. Norwegian Institute of Technology. s. 353 - 362.
13. Gübler, G. Influence of meteorological factors on frost damage in roads. Symposium on Frost Action on roads. Oslo 1983. OECD. s. 37 - 39.
14. Nordal, R.S. Frost heave and bearing capacity during spring thaw at the Vormsund Test Road. Symposium on Frost Action on roads. Oslo 1983. OECD. s. 159 - 169.
15. Bandyopadhyay, S.S., Frantzen, J.A. Investigation of moisture-induced variation in subgrade modulus by cross-correlation method. Washington D.C. 1983. TRB, National Academy of Sciences. Transportation Research Record No 945.
16. Simonsen, P., Hjalmarson, S-O. Grundvattenytans inverkan på bärrigheten. Linköping 1977. Statens väg- och trafikinstitut VTI, rapport 131. 24 s.
17. Mesdary, M.S., Abdel Kader, M.O., Guirguis, H.R. Deformation characteristics of a subgrade soil under static and dynamic loads. International Symposium on Bearing Capacity of Roads and Airfields. Trondheim, Norwaw. June 23 - 25, 1982. Norwegian Institute of Technology. s. 316 - 327.
18. Slyngstad, T. Overbyggnings- og undergrunnsmaterialers egenskaper. Friksjonsjordarter. Rapport från ett seminarium arrangerat av VTI och Veglaboratoriet 8 oktober 1986 i Linköping. Linköping 1987. Statens väg- och trafikinstitut VTI meddelande 512. 155 s.
19. Brown, S.F. Developments in Highway Pavement Engineering 1. Essex, London. 1978.
20. Polish National Report, Question 2 "Construction and Maintenance of Flexible Pavements". XVIII World Road Congress. Brussels. 1987.
21. Maree, J., Van Zyl, N., Freeme, C., Effective Moduli and Stress Dependence of Pavement Materials as Measured in Some Heavy-Vehicle Simulator Tests. Transportation Research Record 852. Washington, 1982.
22. Rada, G., Matthew, W., Comprehensive Evaluation of Laboratory Resilient Moduli Results for Granular material. Transportation Research Record 810. Washington, 1981.
23. TVH:n suunnitteluohje IV. Tien rakenne. 1984.

24. Odemark, N. Undersökning av elasticitetsegenskaperna hos olika jordarter samt teori för beräkning av beläggningar enligt elasticitetsteorin. Stocholm, 1949.
25. Jämsä, H. Pohjamaan kantavuus tierakenteen alla. Espoo 1985. VTT Tie- ja liikennelaboratorio, Tiedotuksia 526. 33 s.
26. Vejbygning. Materialer-Befæstelser-Belægninger. As Phøenix. Tagpap og Vejmaterialer. Vejen, Denmark 1975.
27. Kuukausikatsaus Suomen ilmastoon 1986, 1987, ja 1988. Ilmatieteen laitos. ISSN 0303-2485
28. Hydrologinen yleiskatsaus 1986, 1987 ja 1988. Vesi- ja ympäristöhallitus. Vesientutkimuslaitos. Hydrologian toimisto. ISSN 0358-6367.
29. Solantie, R. 1988. Roudan tulo- ja häviämisajasta. Rakennustekniikka 1988 no 4, s. 233-236.
30. Belt, J., Liimatta, L. Kantavuusmittauksista TVL:n Oulun piirin alueella vuonna 1987. Oulun yliopiston tie- ja liikennetekniikan laboratorion raportteja 3. (julkaisematon)
31. Belt, J., Liimatta, L. Teiden kantavuusvaihteluista vuonna 1988. Tuloksia TVL:n Oulun piirin havaintoteiltä. Oulun yliopiston tie- ja liikennetekniikan laboratorion raportteja 7. (julkaisematon)
32. Lehtonen, K. Tien kantavuusvaihtelut. Väliraportti, luonnos 19.4.1989. Tiehallitus, suunnittelu- ja kehittämiskeskus.(julkaisematon)
33. Bergstedt, B. Bärighetsanalys med fallvikt. Delprojekt: Ytdeflektioners årstidsvariation. Linköping 1989. Statens väg- och trafikinstitut VTI, Notat V 85. 60s.
34. Bergan, A.T., Fredlund, D.G. Characterisation of freeze-thaw effects on subgrade soils. Symposium on Frost Action on roads. Oslo 1973. OECD. s. 169 - 172.
35. Dysli, M. Swiss philosophy and developments concerning the loss of bearing capacity during thaw. International Symposium on Bearing Capacity of Roads and Airfields. Trondheim, Norway. June 23 - 25, 1982. Norwegian Institute of Technology. s. 334 - 343.

36. Van Lopik, J.R., Kolb, C.R. Predicting soil-moisture distribution in areas of seasonal frost. Feasibility study. Final report. Vicksburg 1962. U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station. Misc-paper-3-482. 50 s.

37. Madden, D.A.: Seasonal variation for structural strength. Final report. Maine Department of Transportation, Technical Services Division

38. Moulton, L.K, Dubbe, E.C. Study of the relationship between air temperatures and depth of frost penetration as related to pavement performance of West Virginia's highways. West Virginia 1968. State Road Commission. Report 7. 232 s.

Kanta.bas

```

10 REM KANTAVUUSMITOITUS ODEMARKIN MITOITUSYHTÄLÖN PERUSTEELLA
    MS GW-BASIC Interpreter under MS-DOS
20 DIM A(5),Y(6),H(5),E(5)
30 PRINT "PAALLYRAKENNEKERROSTEN MAARA, ENINTAAN 5"
40 INPUT N
50 PRINT "ANNA ALUSRAKENTEEN KANTAVUUS TAI ALIMMAN KERROKSEN ALTA SAATAVA
    KANTAVUUS [MN/M2]"
60 INPUT Y(N+1)
70 PRINT "ANNA PAALLYRAKENNEKERROSTEN PAKSUUS [M] JA E-MODULI [MN/M2]
    ALIMMASTA KERROKSESTA ALOITTAEN, KUNKIN KERROSTIEDON JALKEEN
    RETURN (CR, EXEC)"
80 FOR K=N TO 1 STEP -1
90 INPUT H(K),E(K)
100 NEXT K
110 FOR K=N TO 1 STEP -1
120 LET A(K)=Y(K+1)
130 IF H(K)>=1 THEN Y(K)=E(K):GOTO 380
140 LET Y(K)=Y(K+1)
150 IF E(K)>=1500 THEN IF K<>1 THEN 400
160 IF E(K)>6*Y(K) THEN IF E(K)<1500 THEN 260
165 LET H=H(K)
170 IF H<=.3 THEN I=1:GOTO 210
180 IF H<.6 THEN I=2:GOTO 210
190 IF H<.8 THEN I=3:GOTO 210
200 LET I=4
210 LET H=H/I:E=E(K)
220 FOR L=1 TO I
230 GOSUB 540
240 NEXT L
250 GOTO 380
260 IF H(K)>=.3 THEN 300
270 LET H=H(K):E=6*Y(K)
280 GOSUB 540
290 GOTO 380
300 LET J=INT(H(K)/.15):H=.15
310 FOR M=1 TO J-1
320 LET E=6*Y(K)
330 GOSUB 540
340 IF E(K)<=6*Y(K) THEN H=H(K)-M*.15:GOTO 170
350 NEXT M
360 LET H=H(K)-(J-1)*.15:E=6*Y(K)
370 GOSUB 540
380 NEXT K
390 GOTO 580:TULOSTUS
400 LET H=0:E=0:SIDOTUT KERROKSET
410 FOR L=K TO 1 STEP -1
420 LET H=H+H(L):E=E+H(L)*E(L)
430 NEXT L
440 LET E=E/H:H(K)=H:E(K)=E
450 GOSUB 540
460 LPRINT
470 LPRINT "SIDOTUT KERROKSET ";K;"-KERROKSESTA LAHTIEN YHDISTETTY ";
    K;"-KERROKSEKSI"
480 LPRINT
490 LPRINT "KERROS","PAKSUUS [M]","E [MN/M2]","EA [MN/M2]","EY [MN/M2]"
500 FOR L=K TO N
510 LPRINT L,H(L),E(L),A(L),Y(L)
520 NEXT L
530 GOTO 630
540 LET B=(1-1/SQR(1+36*H^2))*Y(K)/E:SUBROUTINE
550 LET B=B+1/SQR(1+36*H^2*(E/Y(K))^(2/3)):SUBROUTINE
560 LET Y(K)=Y(K)/B:SUBROUTINE
570 RETURN:SUBROUTINE
580 LPRINT:TULOSTUS
590 LPRINT "KERROS","PAKSUUS [M]","E [MN/M2]","EA [MN/M2]","EY [MN/M2]"
600 FOR K=1 TO N
610 LPRINT K,H(K),E(K),A(K),Y(K)

```

```
620 NEXT K
625 LET K=1
630 LPRINT
640 LPRINT "RAKENTEEN KOKONAISKANTAVUUS [MN/M2]"
650 LPRINT TAB(9);"*****"
660 LPRINT TAB(9);"*, TAB(13);INT(Y(K));TAB(21);"
670 LPRINT TAB(9);"*****"
680 END
```

Kantava.bas

```

10 REM KANTAVUUSMITOITUS ODEMARKIN MITOITUSYHTÄLÖN PERUSTEELLA
20 REM MS GW-BASIC Interpreter under MS-DOS
30 REM JOS RAKENTEESSA VAIN 1 BITUMILLA SIDOTTU KERROS, TULEE SEN OLLA <=0.3 m
40 DIM A(5),Y(6),H(5),E(5),X(3),F(3),PAK(6),EMO(18)
50 DEF FNFF(B,C,D)=D/((1-1/SQR(1+36*B^2))*D/C+1/SQR(1+36*B^2*(C/D)^(2/3)))
70 PRINT
80 OPEN "i",#2,"SADAT.TXT"
90 OPEN "o",#3,"sadat.out"
100 FOR RIVIT=1 TO 111
105 INPUT #2,PIIRI,PISTE,MITT,PAK(1),EMO(1),EMO(2),EMO(3),PAK(2),EMO(4),
EMO(5),EMO(6),PAK(3),EMO(7),EMO(8),EMO(9),PAK(4),EMO(10),EMO(11),EMO(12),
,PAK(5),EMO(13),EMO(14),EMO(15),PAK(6),EMO(16),EMO(17),EMO(18)
110 FOR II=1 TO 6
120 IF PAK(II)=0 THEN N=II-1:GOTO 140
130 NEXT II
140 REM
150 XKANT=1:XMOD=0
160 LET MITK=XKANT*MITT
170 PRINT "PÄÄLLYSRAKENNEKERROSTEN MÄÄRÄ",N
180 PRINT
190 REM x(2)
200 FOR JJ=1 TO 3
210 ALUS=EMO(N*3+JJ)
220 X(2)=ALUS
230 FOR K=N TO 1 STEP -1
240 H(K)=PAK(K)/100:E(K)=EMO(K*3+JJ-3)
250 LET E(K)=E(K)+XMOD
260 NEXT K
270 GOTO 830
280 FOR K=N TO 1 STEP -1
290 LET A(K)=Y(K+1)
300 IF H(K)>=1 THEN Y(K)=E(K):GOTO 560
310 LET Y(K)=Y(K+1)
320 IF E(K)>=1500 THEN IF K<>1 THEN 580
330 IF E(K)>6*Y(K) THEN IF E(K)<1500 THEN 440
340 LET H=H(K)
350 IF H<=.3 THEN I=1:GOTO 390
360 IF H<.6 THEN I=2:GOTO 390
370 IF H<.8 THEN I=3:GOTO 390
380 LET I=4
390 LET H=H/I:E=E(K)
400 FOR L=1 TO I
410 Y(K)=FNFF(H,E,Y(K))
420 NEXT L
430 GOTO 560
440 IF H(K)>=.3 THEN 480
450 LET H=H(K):E=6*Y(K)
460 Y(K)=FNFF(H,E,Y(K))
470 GOTO 560
480 LET J=INT(H(K)/.15):H=.15
490 FOR M=1 TO J-1
500 LET E=6*Y(K)
510 Y(K)=FNFF(H,E,Y(K))
520 IF E(K)<=6*Y(K) THEN H=H(K)-M*.15:GOTO 350
530 NEXT M

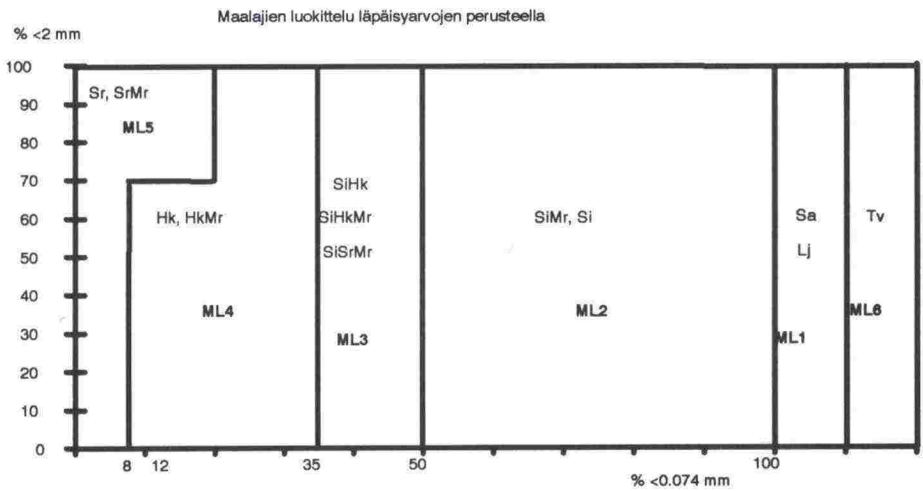
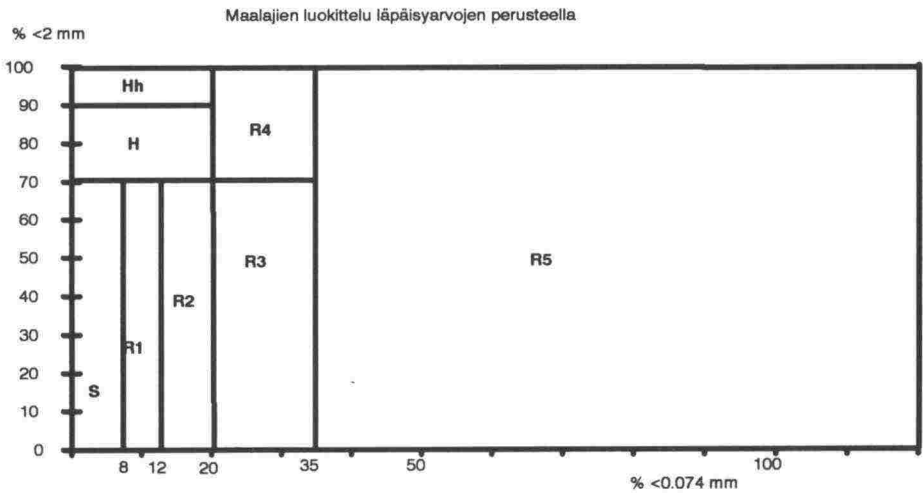
```

```

540 LET H=H(K)-(J-1)*.15:E=6*Y(K)
550 Y(K)=FNFF(H,E,Y(K))
560 NEXT K
570 GOTO 720:TULOSTUS
580 LET H=0:E=0:SIDOTUT KERROKSET
590 FOR L=K TO 1 STEP -1
600 LET H=H+H(L):E=E+H(L)*E(L)
610 NEXT L
620 LET E=E/H:H(K)=H:E(K)=E
630 Y(K)=FNFF(H,E,Y(K))
640 PRINT
650 PRINT "SIDOTUT KERROKSET ";K;"-KERROKSESTA LÄHTIEN YHDISTETTY ";K;"-KERROKSEKSI"
660 PRINT
670 PRINT "KERROS","PAKSUUS [m]","E [MN/m2]","EA [MN/m2]","EY [MN/m2]"
680 FOR L=K TO N
690 PRINT L,H(L),E(L),A(L),Y(L)
700 NEXT L
710 GOTO 770
720 PRINT:TULOSTUS
730 PRINT "KERROS","PAKSUUS [m]","E [MN/m2]","EA [MN/m2]","EY [MN/m2]"
740 FOR K=1 TO N
750 PRINT K,H(K),E(K),A(K),Y(K)
760 NEXT K
770 PRINT
780 PRINT "RAKENTEEN KOKONAISKANTAVUUS [MN/m2]"
790 PRINT TAB(9);"*****"
800 PRINT TAB(9);**;"TAB(13);INT(Y(1));TAB(21);**"
810 PRINT TAB(9);"*****"
820 RETURN
830 PRINT
840 PRINT
850 Y(N+1)=1:ALUSRAKENTEEN EHDOTON ALARAJA, VARMISTETAAN LASKETTAVUUS
860 GOSUB 280
870 IF MITK-Y(1)<0 THEN PRINT "ALUSRAKENTEEN KANTAVUUS <1":GOTO 1080
880 X(1)=1
890 F(1)=MITK-Y(1)
900 Y(N+1)=X(2)
910 GOSUB 280
920 F(2)=MITK-Y(1)
930 IF F(2)<0 THEN GOTO 1090
940 REM *****
950 REM ITEROINTI SEKANTTIMENETELMÄLLÄ
960 X(3)=X(2)-F(2)*(X(2)-X(1))/(F(2)-F(1))
970 IF X(3)<=0 THEN BEEP:GOTO 1080 ' FUNKTIO TAITAA OLLA PAHALAATUINEN
980 IF ABS(X(3)-X(2))<.2 THEN PRINT "OLLAAN RIITTÄVÄN LÄHELLÄ LOPULLISTA ARVOA":GOTO 1230
985 IF X(2)>=1000 THEN GOTO 1230
986 IF X(3)<=1 THEN GOTO 1230
990 Y(N+1)=X(3)
1000 GOSUB 280
1010 PRINT:CLS
1020 PRINT
1030 PRINT "UUSI ITEROINTI",PIIRI,PISTE
1040 F(3)=MITK-Y(1)
1050 X(1)=X(2):X(2)=X(3):F(1)=F(2):F(2)=F(3)
1060 GOTO 960
1070 REM *****
1080 REM ITEROINTI PUOLITUSMENETELMÄLLÄ

```

```
1090 LET X(3)=(X(1)+X(2))/2
1100 IF ABS(X(3)-X(2))<.2 THEN PRINT "OLLAAN RIITTÄVÄN LÄHELLÄ LOPULLISTA ARVOA":GOTO 1230
1105 IF X(2)>=1000 THEN GOTO 1230
1106 IF X(3)<=1 THEN GOTO 1230
1110 LET Y(N+1)=X(3)
1120 GOSUB 280
1130 PRINT:CLS
1140 PRINT
1150 PRINT "UUSI ITEROINTI",PIIRI,PISTE
1160 F(3)=MITK-Y(1)
1170 IF F(1)*F(3)<0 THEN GOTO 1200
1180 LET X(1)=X(3)
1190 GOTO 1090
1200 LET X(2)=X(3)
1210 GOTO 1090
1220 REM *****
1230 PRINT #3,PIIRI;CHR$(9);PISTE;CHR$(9);MITT;CHR$(9);INT(Y(1));CHR$(9);      ALUS;CHR$(9);X(2)
1240 NEXT JJ
1250 NEXT RIVIT
1260 CLOSE 2:CLOSE 3
1270 REM
2000 END
```

pii	pis	lai	tyy	pää	maa	mit	seC		seA		seB		Ke1	Ke2	Ke3	Ke4	Ke5	Ke6
							0.5*	kuiC	1.0*	kuiA	2.0*	kuiB						
12	13	Benk	rtu	AB	Hk	296	19%	6	18%	6	18%	6	9 ab	22 s	26 s	27 hh	57 hh	0 r4
12	14	Benk	rtu	AB	Hk	65	-201%	7	-212%	7	-221%	7	5 ab	8 s	32 s	30 s	37 hh	0 r4
12	15	Benk	rtu	AB	Hk	147	-18%	6	-20%	6	-23%	6	6 ab	39 s	62 h	0 r4		
12	11	Benk	rtu	AB	Hk	82	-155%	6	-159%	6	-163%	6	10 ab	30 s	38 h	48 hh	0 hh	
12	12	Benk	rtu	AB	mHkMr	90	-148%	8	-153%	8	-157%	8	10 ab	38 s	32 h	60 hh	0 r5	
10	1	pud	rtu	AB	Sa	268	46%	7	41%	6	39%	6	5 ab	15 s	30 s	60 hh	0 r5	
10	2	pud	rtu	AB	Sa	329	55%	7	53%	7	52%	7	5 ab	15 s	25 s	80 hh	0 r5	
10	3	pud	rtu	AB	Sa	262	44%	7	41%	6	40%	6	5 ab	15 s	25 s	75 hh	0 r5	
5	19	Benk	krp	KAB	Hk	216	71%	2	57%	2	35%	2	5 kat	15 r1	0 s			
5	24	Benk	krp	KAB	mSi	207	96%	2	93%	2	88%	2	5 kat	10 r1	0 r5			
11	20	Benk	rtu	ÖS	Hk	200	22%	7	15%	7	9%	7	5 ös	10 r1	5 ös	60 s	10 hh	0 r5
9	14	Benk	krp	ÖS	kHkMr	129	68%	2	54%	2	41%	2	40 sas	0 r2				
9	15	Benk	krp	ÖS	kHkMr	116	61%	2	45%	2	32%	2	45 sas	0 r4				
6	31	Benk	rrp	ÖS	kHkMr	235	39%	6	29%	6	22%	5	5 ös	37 s	49 s	0 h		
6	32	Benk	rrp	ÖS	kHkMr	235	68%	5	51%	5	38%	4	4 ös	17 s	7 ös	30 s	0 r4	
6	33	Benk	rrp	ÖS	kHkMr	155	41%	6	22%	6	6%	5	5 ös	10 s	3 ös	22 r1	30 s	0 r4
11	19	Benk	rtu	ÖS	kHkMr	195	57%	7	55%	7	53%	7	5 ös	15 s	5 ös	65 h	10 hh	0 r5
2	1	pud	rrp	ÖS	kSa	98	-49%	6	-65%	5	-75%	5	5 ös	25 s	70 r1	0 r5		
2	2	pud	rrp	ÖS	kSa	108	9%	5	-14%	5	-34%	4	5 ös	15 s	50 r1	0 r5		
2	3	pud	rrp	ÖS	kSa	122	2%	5	-26%	5	-43%	5	5 ös	35 s	40 s	0 r5		
2	5	pud	rrp	ÖS	kSa	113	-23%	5	-49%	5	-63%	5	5 ös	45 s	40 s	0 r5		
2	6	pud	rrp	ÖS	kSa	83	-20%	4	-68%	4	-100%	4	5 ös	25 s	40 s	0 r5		
2	7	pud	rrp	ÖS	kSa	97	-3%	4	-44%	4	-71%	4	5 ös	25 s	40 s	0 r5		
9	16	Benk	krp	ÖS	kSi	65	64%	2	30%	2	2%	2	45 sas	0 r5				
10	7	pud	krp	ÖS	kSi	141	42%	6	34%	6	29%	6	5 ös	45 s	60 r3	0 r5		
10	8	pud	krp	ÖS	kSi	146	42%	7	39%	7	38%	7	5 ös	40 s	85 r3	0 r5		
10	9	pud	krp	ÖS	kSi	142	57%	5	46%	5	36%	5	5 ös	40 s	40 r2	0 r5		
10	13	pud	krp	ÖS	kSi	172	2%	7	-4%	7	-7%	7	5 ös	85 s	40 h	0 r5		
10	14	pud	krp	ÖS	kSi	158	6%	6	-2%	6	-8%	6	5 ös	70 s	40 h	0 r5		
10	15	pud	krp	ÖS	kSi	155	6%	7	0%	6	-4%	6	5 ös	60 s	55 h	0 r5		
9	22	Benk	krp	ÖS	mHkMr	82	74%	2	50%	2	28%	2	40 sas	0 h				
9	23	Benk	krp	ÖS	mHkMr	77	70%	2	41%	2	17%	2	45 sas	0 r2				
6	49	Benk	rrp	ÖS	mHkMr	98	87%	2	74%	2	49%	2	5 ös	22 s	0 r1			
6	50	Benk	rrp	ÖS	mHkMr	103	90%	3	80%	3	59%	3	5 ös	10 s	8 ös	0 s		
6	51	Benk	rrp	ÖS	mHkMr	133	44%	6	16%	5	-13%	5	5 ös	30 s	10 ös	30 s	0 r4	
11	13	Benk	rtu	ÖS	mHkMr	170	56%	5	45%	5	38%	4	5 ös	30 s	45 h	0 r3		0 r4
11	14	Benk	rtu	ÖS	mHkMr	143	44%	7	19%	6	3%	6	5 ös	30 s	5 ös	30 r1	10 h	0 r5
11	15	Benk	rtu	ÖS	mHkMr	174	34%	7	26%	7	21%	7	5 ös	15 s	5 ös	40 r1	35 hh	0 r5
10	10	pud	krp	ÖS	mSi	181	45%	7	34%	7	28%	7	5 ös	50 s	35 h	15 r2	0 r5	
10	11	pud	krp	ÖS	mSi	146	47%	6	36%	6	29%	6	5 ös	35 s	35 h	20 r2	0 r5	
10	16	pud	krp	ÖS	mSi	202	76%	6	58%	6	39%	5	5 ös	75 s	0 r5			
10	17	pud	krp	ÖS	mSi	158	85%	5	78%	4	73%	4	5 ös	60 hh	0 r5			
10	18	pud	krp	ÖS	mSi	167	29%	8	26%	8	23%	8	5 ös	60 s	80 r3	0 r5		
11	61	Benk	rtu	ÖS	mSi	235	37%	9	32%	8	30%	8	5 ab	45 s	20 h	10 r2	60 hh	0 r5
11	62	Benk	rtu	ÖS	mSi	190	84%	4	72%	4	54%	4	5 ab	15 s	15 s	20 hh	0 r5	
11	63	Benk	rtu	ÖS	mSi	200	84%	4	73%	4	55%	4	5 ab	20 s	15 s	15 hh	0 r5	
10	4	pud	krp	ÖS	Sa	125	8%	6	-6%	6	-18%	5	5 ös	70 s	25 r3	0 r5		
6	39	Benk	rrp	ÖS	Sa	113	-47%	8	-61%	8	-71%	7	5 ös	28 s	10 ös	69 s	12 r5	0 r5
6	40	Benk	rrp	ÖS	Sa	96	-71%	8	-86%	8	-96%	8	5 ös	35 s	10 ös	58 s	20 r5	0 r5
6	41	Benk	rrp	ÖS	Sa	143	41%	7	14%	7	-7%	7	6 ös	10 s	12 s	5 ös	50 s	0 r5
12	1	Benk	rtu	ÖS	Sa	98	42%	4	0%	4	-21%	4	10 ös	18 s	14 s	25 hh	0 r5	
12	2	Benk	rtu	ÖS	Sa	160	71%	4	55%	3	39%	3	10 ös	20 s	30 hh	0 r5		
12	4	Benk	rtu	ÖS	Sa	151	53%	5	41%	5	32%	5	3 ös	20 s	13 s	38 hh	0 r5	
12	6	Benk	rtu	ÖS	Sa	125	20%	5	4%	5	-6%	5	11 ös	17 s	15 s	42 hh	0 r5	
12	8	Benk	rtu	ÖS	Sa	110	7%	7	2%	7	-1%	7	3 ös	17 s	15 s	80 hh	0 r5	
12	10	Benk	rtu	ÖS	Sa	151	13%	6	8%	6	5%	6	7 ös	25 s	17 s	69 hh	0 r5	
11	58	Benk	krp	ÖS	Tv	98	-1%	7	-7%	6	-11%	6	5 ös	25 s	15 r1	25 h	50 r5	0 r5
11	59	Benk	krp	ÖS	Tv	85	-24%	7	-43%	6	-55%	6	5 ös	20 s	25 s	20 s	50 r5	0 r5
11	60	Benk	krp	ÖS	Tv	113	26%	7	21%	7	18%	7	5 ös	35 s	15 h	25 r2	40 r5	0 r5
11	26	Benk	rtu	ÖS	Tv	119	-44%	11	-47%	11	-48%	11	5 ös	15 s	5 ös	75 s	80 r5	0 r5
5	10	Benk	rtu	SR	Hk	190	81%	3	79%	3	77%	3	15 sas	35 r2	0 h			
12	23	Benk	rtu	SR	Hk	39	16%	2	-28%	2	-87%	2	5 h	15 hh	0 hh			

12	24	Benk	rtn	SR	Hk	57	40%	2	8%	2	-34%	2	4 r1	16 h	0 r4			
12	31	Benk	rtn	SR	Hk	157	87%	3	86%	3	85%	3	15 r2	42 r2	0 hh			
12	34	Benk	rtn	SR	Hk	143	68%	3	53%	3	33%	3	5 s	10 r1	12 hh	0 hh		
12	35	Benk	rtn	SR	Hk	90	62%	3	50%	3	38%	3	6 r2	12 h	17 hh	0 hh		
5	18	Benk	rtu	SR	Hk	211	54%	3	46%	3	40%	3	20 sas	40 s	0 hh			
11	39	levy	rtu	SR	Hk	31	-113%	8	-115%	8	-115%	8	10 sas	15 r1	40 hh	85 r5	0 r5	
12	38	Benk	rtn	SR	kHkMr	67	37%	4	16%	4	0%	4	4 r2	16 s	5 r5	30 h	0 r2	
12	39	Benk	rtn	SR	kHkMr	59	58%	2	22%	2	-32%	2	5 r2	27 s	0 r2			
12	42	Benk	rtn	SR	kHkMr	86	25%	4	-17%	4	-57%	3	2 r1	49 s	0 r2			
12	43	Benk	rtn	SR	kHkMr	85	48%	3	5%	3	-27%	3	4 r2	44 s	0 r2			
12	44	Benk	rtn	SR	kHkMr	86	19%	4	-23%	4	-60%	3	1 r2	52 s	0 r2			
12	45	Benk	rtn	SR	kHkMr	121	38%	5	10%	5	-14%	4	2 r2	47 s	10 s	0 h		
12	16	Benk	rtu	SR	kHkMr	63	28%	2	-6%	2	-34%	2	20 s	24 h	0 r1			
12	17	Benk	rtu	SR	kHkMr	71	-19%	4	-73%	4	-113%	4	10 s	17 s	27 s	11 s	0 h	
12	19	Benk	rtu	SR	kHkMr	74	9%	3	-40%	2	-90%	2	30 s	23 s	0 r1			
11	36	levy	rtu	SR	kHkMr	71	67%	4	64%	4	61%	4	5 sas	25 r3	20 hh	15 r5	0 r5	
9	1	Benk	rtn	SR	kSi	23	-63%	3	-146%	3	-211%	2	55 sas	0 r5				
9	2	Benk	rtn	SR	kSi	22	52%	1	5%	1	-78%	1	20 sas	0 r5				
10	19	pud	rtn	SR	kSi	36	21%	3	1%	2	-17%	2	55 h	0 r5				
10	32	pud	rtn	SR	kSi	30	31%	3	17%	3	5%	3	10 r1	50 r2	0 r5			
10	33	pud	rtn	SR	kSi	71	68%	4	64%	4	60%	4	10 r1	60 r2	0 r5			
11	33	levy	rtu	SR	kSi	97	74%	8	74%	8	74%	8	5 sas	40 r2	35 hh	70 r5	0 r5	
11	38	levy	rtu	SR	kSi	48	66%	4	56%	4	48%	4	5 sas	25 r2	15 hh	5 r5	0 r5	
12	26	Benk	rtn	SR	mHkMr	75	89%	3	79%	3	63%	3	2 r2	7 r1	8 h	0 r5		
12	28	Benk	rtn	SR	mHkMr	66	62%	3	29%	3	-21%	3	10 r1	33 s	0 r4			
12	29	Benk	rtn	SR	mHkMr	58	79%	2	62%	2	45%	2	2 r2	25 h	0 h			
12	36	Benk	rtn	SR	mHkMr	59	61%	4	36%	4	0%	4	3 r2	30 s	13 r2	0 hh		
12	37	Benk	rtn	SR	mHkMr	62	70%	3	56%	3	42%	3	2 r2	36 h	0 r4			
12	40	Benk	rtn	SR	mHkMr	78	12%	5	-24%	5	-54%	4	4 r2	50 s	25 s	0 r5		
12	41	Benk	rtn	SR	mHkMr	73	57%	4	16%	4	-28%	4	3 r2	49 s	0 r2			
12	20	Benk	rtu	SR	mHkMr	86	57%	3	27%	3	-6%	2	30 r1	24 s	0 r4			
11	37	levy	rtu	SR	mHkMr	52	30%	3	-16%	3	-44%	3	10 sas	25 r1	25 hh	0 r4		
10	25	pud	rtn	SR	mSi	79	83%	3	77%	3	70%	3	10 r1	40 r3	0 r5			
10	26	pud	rtn	SR	mSi	31	36%	3	9%	3	-21%	3	25 r1	35 r3	0 r5			
10	27	pud	rtn	SR	mSi	39	68%	2	45%	2	16%	2	25 r1	20 r3	0 r5			
10	28	pud	rtn	SR	mSi	58	71%	3	60%	3	49%	3	16 r1	30 r4	10 r5	0 r4		
11	34	levy	rtu	SR	mSi	105	75%	3	75%	3	75%	3	5 sas	15 r2	15 hh	0 r5		
11	35	levy	rtu	SR	mSi	96	66%	3	66%	3	66%	3	10 sas	25 r2	30 hh	0 r5		
10	22	pud	rtn	SR	Sa	54	71%	2	63%	2	58%	2	30 r2	20 h	0 r5			
10	23	pud	rtn	SR	Sa	37	60%	3	49%	3	41%	3	35 r2	15 h	0 r5			
10	24	pud	rtn	SR	Sa	24	24%	2	-12%	2	-49%	2	35 h	0 r5				
12	21	Benk	rtn	SR	Tv	76	90%	2	81%	2	64%	2	10 r1	19 hh	0 r5			
12	22	Benk	rtn	SR	Tv	53	89%	2	78%	2	58%	2	5 r1	20 hh	0 r5			
12	25	Benk	rtn	SR	Tv	75	92%	3	84%	3	71%	3	5 r2	8 r1	15 h	0 r5		
12	30	Benk	rtn	SR	Tv	56	79%	3	62%	3	48%	3	6 r2	42 h	0 r5			
12	32	Benk	rtn	SR	Tv	50	70%	3	41%	3	11%	3	15 r1	32 hh	0 r5			
12	33	Benk	rtn	SR	Tv	39	66%	3	33%	3	7%	3	7 r1	41 hh	0 r5			
11	40	levy	rtu	SR	Tv	49	62%	3	23%	3	-31%	3	15 r1	40 r1	0 r5			
11	41	levy	rtu	SR	Tv	40	59%	3	18%	3	-59%	3	15 s	35 r1	0 r5			

VE 2:n kerrosmoduuleilla ja eri alusrakenteen

E-arvoilla lasketut kantavuudet. Pohjamaan normiarvoa muutetaan kertoimilla 0,5 ja 2.

Rakennekerrosten paksuudet ja tunnukset.

SARAKKEIDEN SELITYKSET

pii tiepiiri

pis mittauspisteen numero

lai mittauslaite

tyy rakennetyyppi; rak=rakennettu, rtn=rakentamaton,
krp=kevyesti parannettu, rrp=raskaasti parannettu tie

pää päällysteen laatu

maa pohjamaan laatu

mit mitattu kevätkantavuus

se suhteelliset erot=(mit-las)/mit (%) eri tapauksissa A,B,C.
A=normiarvo, B=0,5 kertaa normiarvo, C=2 kertaa normiarvo.

kui kuinka monta kertaa kaksikerroskaavaa on käytetty

TIELAITOKSEN SELVITYKSIÄ

- 1/1991 Satelliitteihin perustuvasta paikannusjärjestelmästä. TIEL 3200001
- 2/1991 Autokanta ja liikenne OECD-maissa. TIEL 3200002
- 3/1991 Tiesalaojen toimivuus ja kunnossapito. TIEL 3200003
- 4/1991 Suolauksen vaikutukset tienvarsikasvillisuuteen. TIEL 3200004
- 5/1991 Reunapaalujen vaikutus ajokäyttäytymiseen ja liikenneonnettomuuksiin. TIEL 3200005
- 6/1991 Yleiskaavoituksen ja tien yleissuunnittelun kytkentä. TIEL 3200006
- 7/1991 Teiden esisuunnittelu Pohjoismaissa. TIEL 3200007
- 8/1991 Palvelutasomittareiden seuranta tiensuunnittelussa. TIEL 3200008
- 9/1991 Luonnonolojen seuranta tiensuunnittelussa. TIEL 3200009
- 10/1991 Tielaitoksen laatujärjestelmän kehittäminen; suunnittelun laatujärjestelmä, esiselvitys. TIEL 3200010
- 11/1991 Ympäristövaikutusarviot pääsuuntaselvityksissä. TIEL 3200016
- 12/1991 Selvitys nopeuden alentamiskeinoista taajamateillä. TIEL 3203613
- 13/1991 Selvitys nopeusrajoitusten määrittämisestä ja vaikutuksista. TIEL 3200011
- 14/1991 Jalankulkijan ja pyöräilijän vammautumiset liikennealueilla. TIEL 3200012
- 15/1991 Liikenneinvestoinneista päättäminen; Arvio suunnittelunäkemyksestä. TIEL 3200013
- 16/1991 Paristotyyppin ja ympäristön lämpötilan vaikutus varoitusvilkun toimintaan. TIEL 3200014
- 17/1991 The Effect of Battery Type and Ambient Temperature on the Operation of Warning Flashers. TIEL 3200015E
- 18/1991 Pohjaveden suojaus maatiivisteellä tien luiskassa. TIEL 3200017
- 19/1991 Liikennetunnelien kuivatus- ja lämpöeristysrakenteet. TIEL 3200018
- 20/1991 Kunnossapidon tuloksen mittaus. TIEL 3200019
- 21/1991 Tiesuolauksen vaikutus pohjaveteen Salpausselän alueella. TIEL 3200020
- 22/1991 Tiekohtaiset nopeusrajoitukset ja onnettomuudet 1984 - 1988. TIEL 3200021
- 23/1991 Kiertoliittymät ja niiden välityskyky. TIEL 3200022
- 24/1991 Teiden kantavuusvaihtelut 1987-89. TIEL 3200023